



"我可以触摸这个吗？"。通过触觉解决方案进行的虚拟现实互动调查

Elodie Bouzbib, Gilles Bailly, Sinan Haliyo, Pascal Frey

► 引用此版本。

Elodie Bouzbib, Gilles Bailly, Sinan Haliyo, Pascal Frey. "我可以触摸这个吗？通过触觉解决方案的虚拟现实互动调查。 32e Conférence Francophone sur l'Interaction Homme- Machine (IHM '20.21), April 13-16, 2021, Virtual Event, France, April 2021, Metz, France. hal- 03122267

HAL Id: hal-03122267

<https://hal.science/hal-03122267>

于2021年2月10日提交

HAL是一个多学科的开放性档案，用于存放和传播科学研究文献，无论它们是否已出版。这些文件可能来自法国或国外的教学和研究机构，或来自公共或私人研究中心。

HAL多学科档案馆的目的是收集和传播来自法国或外国教育和研究机构、公共或私人实验室的科学研究文件，无论是否公开。

"我可以触摸这个吗？"。通过触觉解决方案进行的虚拟现实互动调查

Revue de Littérature des Interactions en Réalité Virtuelle par le biais de Solutions Haptiques

Elodie Bouzbib
ISIR.索邦大学ISCD。
Sorbonne Université
法国, 巴黎

吉勒-贝利-
西南-哈利约
ISIR.法国巴黎索邦大学

Pascal Frey
ISCD. 巴黎索邦大学, 法
国

ABSTRACT

触觉反馈已经成为提高虚拟现实 (VR) 中用户体验的关键。这就证明了在过去的几年里, 人机交互界提出的新的触觉解决方案的突然迸发。这篇文章是对依靠触觉设备的虚拟现实交互的一个调查。我们提出了两个维度来描述和比较当前的触觉解决方案: 它们的物理性程度以及它们的驱动程度。我们描述了用户和设计者之间的妥协, 强调了VR中所需要的或建议的刺激范围是如何与触觉界面的灵活性和它们在现实生活中的部署相对立的。这篇论文(1)概述了各种触觉解决方案, 并为分析其相关的互动提供了一个新的视角, (2)高亮了目前关于这些互动的评价标准的局限性, 最后(3)反映了 "遇到的触觉设备类型" 的互动、操作和概念的潜力。

CCS概念

• 以人为本的计算 → 虚拟现实; 触觉功能; 交互设计理论、概念和范式。

关键字

触觉、虚拟现实、人类因素、触觉设备

总结

为了提高用户对真实性 (RV) 的体验, "回溯" (retour haptique) 是必不可少的。这就是为什么我们观察到最近几年在国际妇女理事会上提出的合题解决方案数量激增的原因。这篇文章是一篇关于RV中的相互作用的文献综述, 它适用于haptiques装置。我们提出了两个维度来描述和比较haptiques装置: 它们的物理程度和它们的机器人化程度。我们提出了一个利用者/概念者的折衷方案, 反映了RV中所要求/提出的各种刺激, 与界面的灵活性和它们在现场的应用相对立。这项工作(1)提供了一个全景式的解决方案。

允许为个人或课堂使用本作品的全部或部分制作数字或硬拷贝, 不收取任何费用, 但拷贝不得以营利或商业利益为目的而制作或分发, 且拷贝首页须注明本通知和完整的引文。必须尊重ACM以外的其他人拥有的本作品的版权。允许摘录并注明出处。以其他方式复制, 或重新发表, 张贴在服务器上或重新分发到名单上, 需要事先获得特别许可和/或付费。请向permissions@acm.org 申请许可。

IHM '2021, 2021年4月13-16日, 法国梅兹。

© 2021年计算机协会。ACM ISBN 978-x-xxxx-xxxx-x/YY/MM..\$15.00
<https://doi.org/10.1145/XXXXXXX.XXXXXXX>

(2)指出了这种类型的互动的评价标准的局限性, 最后(3)反映了 "间歇性接触" 界面在互动、操作和概念上的潜力。

医学博士

合理化, 真实性, 人类的因素, 合理化装置

ACM参考格式。

Elodie Bouzbib, Gilles Bailly, Sinan Haliyo, and Pascal Frey.2021."我可以触摸这个吗？"。通过触觉解决方案对虚拟现实互动的调查。In *IHM '2021 : 32^e conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine, April 13-16, 2021, Metz, France*.ACM, New York, NY, USA, 16 pages. <https://doi.org/10.1145/XXXXXXX.XXXXXXX>

1 简介

在过去的几年里, "虚拟现实" 和 "触觉" 一直是ACM CHI或ACM UIST等人机交互会议上引用最多的关键词之一。的确, 头戴式显示器 (HMD) 现在价格低廉, 并能提供高质量的视觉和听觉反馈, 但通过触觉 (触觉反馈) 增强VR的体验已成为一个主要挑战。目前已经提出了大量的触觉解决方案, 然而, 由于触觉功能的广泛性, 它们的范围高度不同。因此, 很难比较它们的异同, 也很难对设计的可能性有一个清晰的认识。

在本文中, 我们介绍了对现有的VR中的 *触觉交互* 的调查。我们使用 "触觉交互" 来强调对用户行为的关注, 并分析 "触觉设备" 如何影响他们在VR中的行为。

我们综合了现有的关于VR中触觉交互的研究, 并从所需的触觉特征刺激和交互机会出发, 描述了一个设计空间, 根据两个维度对相关的触觉解决方案进行了讨论和分类: 它们的 *物理性程度*, 即它们在复制物体方面的物理一致性和相似程度, 以及它们的 *驱动程度*, 即它们是否依赖于基于电机的硬件实现, 使界面自主位移 (如改变其形状或位置) (表1)。

这个设计空间对于描述、分类和比较触觉互动和相应的触觉解决方案是很有用的。我们还提出了两个标准, 即用户体验和概念成本, 突出了 *用户质量* 之间的隐性权衡。

经验和设计师实现这些解决方案的复杂性。因此, 在一个评估触觉交互的新框架中, 用户和设计师的观点都得到了考虑。最后, 我们通过分析和比较四个触觉解决方案来说明我们设计空间的效用。这一分析表明

(1)在虚拟环境中使用真实的道具有利于用户体验, 但将交互限制在VR领域内现有的道具上; (2)使用机器人界面可以实现更多不同的交互; (3)将它们结合起来可以提供最佳的用户体验/设计成本权衡; (4)目前的评估方法不允许对触觉解决方案进行公平的表述和对比。

因此, 我们提出了从用户和设计者的角度来评估触觉交互的准则。我们还通过对机器人图形界面的深入调查, 概述了交织的界面如何扩大触觉的机会。

[101] .事实上, 在追求终极显示的过程中[147], 这些显示(a)互动的种类最多, (b)通过其自动化实现最可靠的界面, 以及(c)最自然的互动, 因为它们用户在用户感兴趣的位置遇到了用户, 无需再另行通知。

2 背景情况

虚拟现实的调查考虑了技术本身和它的局限性[188, 191], 或者更具体地说, 它的使用场景。VR确实被用于工业[20, 195]、医疗[103]或游戏中。在游戏中, 人们关注的主要是评估程序[102], 即存在[130]和其相关的问卷调查[131, 163]。例如, 调查比较了在VR或现实世界中进行问卷调查的结果[9, 116]。用户在VR中的行为也被分析, 通过手势识别

[123]或系统控制技术(如菜单)[25]。

这些研究领域在触觉方面巧合地几乎是相似的。事实上, 调查分析了触觉本身[164]、触觉设备[63, 117, 132, 152]或研究了从触觉线索刺激中受益的场景。触觉技术被用于远程操控[53], 用于工业培训[22, 177]或医疗目的[35, 118], 或用于游戏[78]。

最后, 在VR和触觉的交叉点上提出了一些调查, 并关注具体的方法(伪触觉反馈)[96], 根据刺激的触觉特征(温度、形状、皮肤拉伸、压力)的技术[42, 169]或每个触觉设备类别的动机和应用[168]。相比之下, 我们的调查概述了VR中触觉互动的多样性和提供了一个框架来分析它们。

3 范围和定义

本文的范围是分析单个用户如何在虚拟现实中进行交互并获得可信的触觉反馈[97]。因此, 我们定义了"虚拟现实"和"触觉"这两个术语以及它们之间的关系。

3.1 虚拟现实

虚拟现实对应的是用户沉浸在其中的三维人工数字环境。该环境可以被投射到

例如, 在一个模拟平台中, 将图像投射到一个大屏幕上, 或多个屏幕上, 如CAVE技术(图像被投射到一个房间规模的竞技场的至少3面不同的墙上)。在这项调查中, 我们考虑的是一种人工现实[172], 在这种情况下, 用户不会感知到他们的物理环境: 外部世界是不明显的, 用户通过头戴式显示器(HMD)完全沉浸其中。例如, 增强现实(AR), 其中物理环境被虚拟的人工制品所增强, 不在我们的范围之内。

通过头戴式显示器(HMD), 虚拟现实为用户创造了沉浸式体验。这些只受设计师想象力的限制, 并通过临场感进行评价。临场感被定义为"在一个地方的主观体验, 即使一个人在另一个地方的物理位置"[139, 175]。它通过控制、感觉、分心和现实因素来量化用户的参与和互动的自然度。这在很大程度上依赖于感官的输入和输出渠道, 然而, 由于VR主要是整合音频和视觉线索, 量化体验中的触觉贡献仍然很困难。

3.2 触觉。触觉与动觉的感知

触觉是触觉的总称。它们是两种线索的组合: 触觉和动觉。触觉线索

通过皮肤发展, 而运动感则来自本体感觉, 是通过肌肉和肌腱。

3.2.1 触觉线索: 皮肤由四种类型的机械感受器组成[87]。第一类是

"默克尔神经末梢", 传递机械压力、位置和形状或边缘。

例如, 在阅读盲文时, 它们会受到刺激。第二种是"Ruffini corpuscle end-organ", 对皮肤拉伸敏感, 同时提供压力和滑移信息。第三种是"帕西尼亚氏体", 对振动和预设敏感。最后一种是"迈斯纳氏体", 高度敏感, 提供轻触和振动信息。它还包含温度感受器, 传递有关温度的信息: 鲁菲尼末梢对温暖作出反应, 而克劳斯末梢则对寒冷作出反应。因此, 通过触觉线索, 人类可以感觉到形状或边缘、压力、振动或温度变化。

3.2.2 动觉线索: 动觉线索依赖于本体感觉, 即对我们自己身体部位位置和运动的感知和意识。肌肉中的机械感受器, 即

"转轴", 向神经系统传递肌肉产生的力量以及其长度变化的信息[77]。主要类型的转轴对肌肉收缩或肢体运动的速度和加速度敏感, 而第二类型的转轴则提供关于静态肌肉长度或肢体位置的信息。因此, 运动学线索允许感受力量, 以及感知重量或惯性。

3.3 VR与触觉

每当我们触摸或操作一个物体时, 前面这两个线索的结合就可以理解它的材料, 也可以理解它的形状和它对用户意味着的约束。一方面, 在VR中通过触觉反馈增加物理存在[92], 增强了用户的沉浸感, 甚至在情感和生理方面: 用户的心率可以真正地增加

通过真实物体使用触觉技术[73]。触觉技术也是

用户需要控制环境的变化[66], 并意识到他在物理上所做的修改(例如移动虚拟物体, 按下下一个按钮)。在另一方面, 触觉可以从VR中获益。例如, Lécuyer等人利用用户的视觉, 分析它如何影响他们的触觉反馈[96]。这种方法, 即“**伪触觉反馈**”, 欺骗用户的感知来感受虚拟物体的硬度、纹理和质量。还有许多触觉特征可以被刺激, 如温度、形状、皮肤拉伸、压力。

4 分析触觉互动

这项调查的主要目的是为评估和比较触觉互动提供分析工具。

4.1 设计空间

我们提出了一个二维的框架来讨论和分类VR中的触觉解决方案(见表1)。

第一个维度是它们的**物理性程度**, 即触觉感知如何与虚拟物体有形/物理一致/相似。这个维度被画成一个连续体, 从“无物理性”到“真实物体”(见图2)。我们发现, 这个连续体可以被分为两类: 他们是否使用真实物体。

第二个正交维度是它们的**驱动程度**, 即触觉解决方案是否依赖于基于电机的硬件实施, 从而实现自主位移(例如能够改变其形状、位置等)。

4.2 分析标准

我们考虑两个主要的标准来分析VR中的触觉交互。它们涵盖了用户和设计师的观点。

用户体验是第一个标准, 包括两个方面: 交互机会和视觉-触觉的一致性/差异性。交互机会是指触觉解决方案在多大程度上允许用户在VR场景中进行交互/操作(如导航、探索、操纵), 而不是在现实世界中。视觉-触觉的一致性/差异性指的是这些互动的触觉和运动知觉的呈现。这两个子标准是互补的, 侧重于行动和感知。第二个标准是概念成本, 即**设计者**在设计触觉交互时应该解决的挑战。我们区分了实施和操作成本。实施成本包括与触觉解决方案的可接受性有关的几个技术方面, 如安全性、坚固性和易用性[42]。

运营成本包括部署这些技术所需的资金和人力成本。

4.3 应用

我们依靠这个设计空间和标准来强调和理解用户在VR中的交互机会和设计师在构思中的挑战之间的权衡。这项调查为研究人员提供了一个研究VR中触觉交互的新视角。它可以被用来比较和分析评估现有的触觉交互方式。对于一个特定的应用, 设计师可以评估最适合的触觉交互。对于一个特定的技术。

| 机器人技术和执行 | |
|----------|---|
| 执行 | 没有 是 |
| 身体力行 | 形状模拟 伪触觉 视觉 -触觉幻觉 物体基元 表面触觉显示器 |
| 没 | 桌面触觉界面 2.5D平板电脑 形状变化的机器人模型 控制器 可穿戴设备 肌肉电刺激 中空触觉技术 充气房地板 |
| 真实的物体 | |
| 是 | 被动触觉 视觉触觉幻觉 伪触觉 人体执行器 真实道具的重新分配 |
| 没 | 机器人形状显示器 • 笛卡尔机器人 • 机器人手臂 • 蜂群机器人 • 移动平台 • 无人机 • 旋转木马平台 |

表1: 我们提出了两个维度来对当前的技术进行分类: 它们的物理性和执行程度。

他们可以根据自己的需要(任务、工作空间、用例等)来评估触觉解决方案。

我们首先从用户的角度讨论触觉交互(第5节-交互机会, 第6节-视觉-触觉的一致性/差异性)。然后, 我们在第7节中采用设计师的视角。我们在第6节和第7节中使用了我们的设计空间, 强调了触觉解决方案。

5 互动机会

在现实世界中, 用户可以不受约束地**自由移动**, **挑选他们环境中的任何物体**, 然后用他们的双手进行**互动**。他们也可以与环境(风、意外的障碍物)或其他用户进行**互动**, 例如吸引他们的注意力或引导他们去某个地方。自然环境也自然地通过他们的**整个身体**对用户进行物理约束。

在这一节中, 我们将讨论VR中的交互机会和提供这些机会的方法。特别是, 我们通过四个主要任务来讨论它们: 导航、探索、操纵和编辑。

5.1 导航

我们将导航任务定义为通过视觉对环境进行探索, 以及通过用户的位移对环境进行导航的能力。我们确定了三种在VR中进行导航的主要技术。前两种依赖于控制器和按钮, 用户没有必要进行物理移动。最后一种是更自然的, 因为它允许用户在VR舞台上行走。

5.1.1 平移。通过接地的桌面触觉解决方案, 如Virtuose[62], 用户需要按下一个按钮来攥紧设备, 从而在环境中移动。

5.1.2 指向和传送。对于没有地面的解决方案, 如控制器, 常见的技术是远距离传输。用户将他们的控制器[14]指向预先确定的传送目标区域, 并在位置和方向上发生位移[51](图1-1)。



图1：VR中的任务：（1）通过Point & Teleport的导航[51]；（2）通过建筑物的导航，使用重定向的方式[27]；（3）赤手空拳的探索。用户找到一个看不见的触觉代码[24]；（4）操纵。触觉代理重新排列，形成用户可以操纵的平面[190]；（5）版本：用户改变触觉2.5D桌面的形状[105]；（6）用户通过机械臂与之互动，感受情绪[155]。

5.1.3 真实行走。VR中的真实行走，即“漫步”，已经显示出最好的沉浸感和临场感[142, 162]，因为它依赖于通过腿部和步态意识的本体感觉和动觉反馈。尽管如此，VR领域并不是无限的，HMD的跟踪空间也是有限的，因此需要开发一些方法让用户能够移动到任何感兴趣的地方。一种方法是将之前讨论过的接地的桌面触觉解决方案安装在移动[49, 88, 89, 106, 111, 126]或可穿戴设备上。[17]接口。然而，用户仍然需要持续地将手柄放在他们的手掌上。因此，其他的界面允许自由手房间尺度的VR[24, 170, 181]。为了让用户在无限的工作空间中行走，虚拟环境也可以在视觉上被扭曲，让用户无意识地修改他们的轨迹或避开障碍物[27, 119, 179]（图1-2）。这种无限重定向也可以由用户腿上的肌肉电刺激（EMS）提供[12]，使用可穿戴的电极。用户也可以穿上驱动的高跷来感知楼梯[129]，或者穿上振动的鞋子来感知虚拟材料[145]。为了不受这些可穿戴技术的束缚，VR领域还可以包括机器人技术：例如，用户可以在跑步机上行走[50, 166]，或者在与他们的脚相遇的可移动平台上行走[74, 75]。

5.2 手部互动

在现实世界中，赤手空拳的互动对于执行日常任务（探索、操纵、编辑）非常重要。然而，在VR中，用户通常必须握住控制器、可穿戴设备或手柄，这就造成了用户感觉和看到的東西之间的差异[182]。这些都是利用了神-物原则[194]，而不是赤手空拳的真实触摸互动。

5.2.1 上帝-物体。控制器被认为是用户双手的延续，由一个不经历物理或刚性碰撞的代理所代表，并被连接到一个具有弹簧阻尼模型的互补刚性物体。因此，后者与代理一起移动，但受到环境的限制。每当它与感兴趣的物体发生碰撞时，用户就会通过运动反馈感知到之前的弹簧减振器的硬度。因此，用户通过一个代理，如桌面鼠标，与用户的视觉不一致的位置进行互动。根据不同的使用情况，不一定需要赤手空拳的互动。例如，在医疗和外科培训中，用户更需要

有可能与一个工具，如手术刀或钳子，进行互动。因此，持续持有神物并不是一种约束，但建议将视觉和触觉放在一起[109]。

5.2.2 真实触摸：在其他场景中，例如游戏、工业或工具培训[143, 174]，通过道具和真实物体使用适当的工具是比较自然的。然而，用户需要在需要的时候能够接触到它们。因此，一些界面（例如机器人图形；见第7.3节）就是在这些方面开发的，以便在用户觉得要互动的时候遇到他们。

5.3 勘探

与之前基于视觉线索的“导航”定义不同，“探索”任务包括触摸环境和理解其约束的能力。在VR中彻底探索一个环境可以通过不同的触觉特征来完成，并且可以提高用户的深度感知[98]或与物体的距离。探索环境的不同方法将在第6节详细介绍。

每当用户在探索环境时，形状或纹理是通过他的身体位移来感受的。他需要移动以使他的皮肤伸展（通过触觉线索）或他的肌肉收缩（通过运动学线索）。

5.3.1 通过触觉线索。只要有真实的道具或材料补丁，用户就可以自然地与他们的指尖互动，感受不同的材料[11, 41]、质地[19, 93]、温度[192]，或者通过他们的双手感受形状和图案[24, 30]（图1-3）。当没有实物可用时，仍然可以进行刺激。正如在Surface触觉显示器中所看到的那样[18]，80到400赫兹之间的振动可以通过皮肤感受到，因此用户可以感知到粘性、光滑、愉悦、振动或摩擦，例如探索三维地形或体积数据[137]。然后，振动可以与听觉和视觉线索相结合，在VR中渲染碰撞[23]。

5.3.2 通过动觉线索。探索环境也可以通过动觉线索来完成：例如，用户可以通过使用肌肉电刺激（EMS）来感受墙壁的物理约束[95]。通过神-物原则，用户也可以通过力反馈来探索环境的约束。在这种配置中，用户的手臂被限制在

通过触觉的桌面界面, 提供足够强大的力量来模拟物理碰撞和辨别形状。

5.4 操纵

每当修改一个物体的位置和方向时, 就会执行一个操纵任务。

5.4.1 直接操纵。在VR中, 我们将*直接操纵*[26], “*用户以直接和自然的方式控制虚拟环境中的物体的能力, 就像在现实世界中操纵物体一样*”, 与用控制器指向/选择一个物体区分开。直接操纵依赖于通过运动反馈来握住物体的能力, 感受其重量[67, 95, 124, 134, 186, 187]、形状[48, 85, 146], 以及来自虚拟环境的约束, 例如在使物体相互作用时[24]。改变虚拟物体的位置或方向可以作为虚拟环境中的输入: 例如在[190]中, 用户通过移动真实环境中的手柄道具来修改灯光强度。通过在VR中移植[94], 一个物体甚至可以向用户传达其动态用途。

5.4.2 伪触觉操纵。在触觉上利用视觉可以用不同的摩擦力、重量或力的感觉来移动物体[115, 120, 121, 125]。例如, 视觉上降低虚拟道具位移的速度会导致用户移动它的力量增加, 修改他们的摩擦/重量感知。

5.5 版本

我们将版式任务限定为对物体属性的修改, 而不是其方向或位置(例如通过其比例[176]或形状)。

5.5.1 物理版。在VR中编辑一个界面需要它完全配备传感器。以可穿戴设备为例, 手的趾骨位置是已知的, 并且可以与物体属性紧密联系起来[165]。知道自己的位置后, 模块化的界面可以被重新排列, 以提供拉伸或弯曲的任务[46], 或者用工具推开以缩小尺寸[154]。形状改变的界面已经被开发出来, 以动态地修改材料属性[105] (图1-5) 或增强增强现实 (AR) 中的相互作用[91], 然而这些技术只考虑到HMD和VR作为未来的工作方向。

这些界面是相关的, 因为2.5D平板已经在VR中使用。通过它们对虚拟世界进行物理编辑, 在不久的将来可以通过将这些界面与三维建模技术交织在一起来实现[38]。

5.5.2 伪触觉版。改变真实物体属性背后的困难是要实时跟踪它。这就是为什么伪技术是相关的: 它们在视觉上改变了物体的属性, 如它们的形状[7]、顺应性[90, 136], 或它们的弯曲曲率[68], 而不需要物理地编辑物体。

5.6 基于情景的互动

在现实世界中, 人类可以自由地与任何物体进行互动, 而不需要进一步通知。在这方面, 普通的控制器可以通过指点与任何物体进行互动, 但它们显示出很高的视觉-触觉差异。在更先进的触觉渲染的

在虚拟环境中, 用户往往被限制在基于场景的互动上: 根据场景的进展, 只有少数可互动的对象可用。

虚拟: 物理触觉的一致性越大, 就越难增强非决定性的场景, 在这种情况下, 用户可以自由地与任何物体互动, 而不考虑场景的进展。在非决定性的场景中, 高质量的触觉渲染可以通过三种方法实现: (a) 众多的物体和基元可用于交互[69]; (b) 在交互之前要预测用户的意图, 使其发生[24, 30]。

(c) 道具修改自己的拓扑结构以符合用户预期的触觉渲染[138]。

5.7 环境引发的互动

在具有有形界面的现实和虚拟环境中, 用户通常是决策者, 可以在接下来的交互中选择他们的接触点。然而, 用户本身也可以被认为是无形的界面: 不受控制的互动, 比如被同事触摸, 或者感受环境中的温度变化[133, 192], 是日常互动的一部分, 可以被移植到虚拟现实。例如, 在VR中复制社会性的触摸互动, 可以增加存在感[71]或唤起情感[155]。

这种类型的互动在体育模拟中经常出现, 用户承受着来自环境的力量, 并感知到冲击 (跳入太空[58], 射出足球[167], 足球比赛中的守门员[157], 滑翔伞[180], 拦截排球[60], 飞行[29])。

这些互动涉及多种力的类型: 拉力、追踪力、反作用力、阻力、冲击力, 有助于提高用户在VR中的体验[170]。这些力甚至可以强大到通过力量引导用户[24]。

5.8 全身参与

所有前面的小节都唤起了主要由手或手指组成的互动。这种范式在[193]中被撤销: 用户应该能够选择他的姿势。这一点目前只在房间规模的VR应用中实现, 在那里用户可以体验到坐、站、爬或蹲[24, 36, 148, 154]并与他们的整个身体进行交互。

6 视觉-触觉的一致性/差异性

视觉-触觉的一致性用户体验的第二个方面。我们利用我们的设计空间的*物理程度* (表1) 来讨论不同的触觉解决方案。特别是, 我们区分了这些解决方案是否使用真实的物体 (利用真实的物体) 或不使用 (模拟物体)。

6.1 模拟对象

需要模拟的物体属性是其形状、纹理、温度、重量。

6.1.1 没有实体性, (图2 - 1)。目前, 接地的触觉设备, 如Virtuose[62]或PHaNTom[100], 通过其形状来模拟物体 (图2 - 1)。呈现的只是

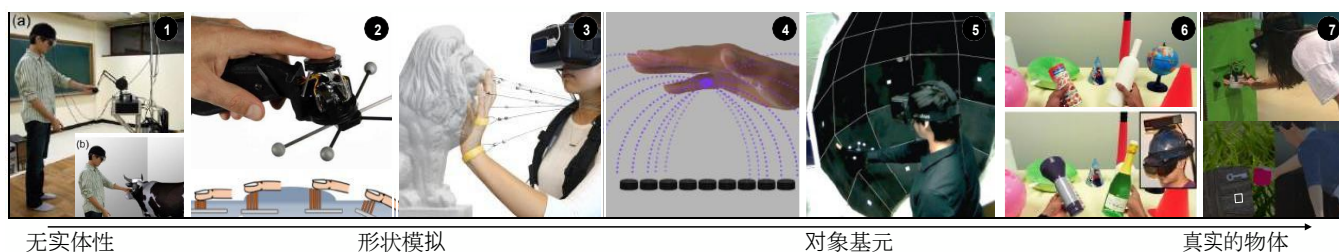


图2: VR中物理性的连续程度。(1)触觉桌面设备能够通过手柄[89]与神-物原理来探索环境;(2)控制器[19]或(3)可穿戴设备[45]模拟物体进行探索任务;(4)中空技术[117]通过用户的手创造振动来模拟一个物体。(5)被动代理面向用户用手感受物体的基元[30];(6)环境中的物体被分配给具有相同基元的虚拟道具[69];(7)真实物体或被动道具可以被操纵和相互作用[24]。

通过代理人的运动学反馈来完成。从概念上讲, 用户和这个代理之间的理想联系是一个无质量、无限刚性的棍子, 这相当于直接移动代理[63, 127]。这些解决方案只提供手部规模的刺激, 而不考虑身体的其他部分。

6.1.2 形状模拟, (图2-2-3-4)。在同样的方面, 手套或控制器提供了一些物理特性 (图2-2-3)。手套或外骨骼可以约束用户的手来模拟形状[2, 6, 8, 10, 32, 33, 45, 57, 104, 114, 158], 或者刺激其他触觉特征, 如硬度、摩擦[165]或滑移[156]。这些可以扩展到整体的身体套装, 让用户感受到冲击甚至温度变化[3, 37], 甚至与接地设备交织在一起, 以扩展其使用范围[141]。目前, 定制的控制器的设计为刺激手掌[39, 146, 185] (图3-1, 2), 或者被握在手掌中, 同时在指尖提供触觉反馈。例如, [173]提出了具有不同质地或形状的可互换的触觉轮, 而[19]实现了质地和形状, [90]显示了顺应性变化。在这些配置中, 用户持有一个控制器, 然而, 通过组合两个控制器, 可以创造出双人工的互动。他们之间的联系传递着运动学反馈。

并将它们各自的位置相互制约[144, 171]。非接触式技术也已经被开发出来用于模拟形状。虽然研究表明, 赤手空拳的互动增加了用户的认知负荷[52], 但将赤手空拳的互动与触觉反馈相结合, 实际上增强了用户的参与度。由于触觉反馈需要接触, "少接触" 技术定义了一种互动, 在这种互动中, 用户是没有人的, 根据Krueger的假设[172], 超声波被发送到他们的手上, 让他们感知皮肤上的形状, 而没有物理道具的接触[117] (图2-4)。

这些不受约束的方法也可以通过改变形状的界面来实现，例如气球阵列[151]或2.5D平板（图3-3，图1-5）[48, 76, 138]。后者是由销子构成的，它们可以自行升高和降低以复制不同的形状。同样地，蜂群界面也会重新排列以显示不同的形状。这些主要是在现实世界中开发的[43, 79, 86, 99, 149, 150]，但作为VR的用户界面，它们也慢慢起飞了[190]（图1-4）。事实上，当这些最新的设备被用作桌面界面时，蜂群机器人的想法已经延伸到空中，例如无人机[54, 70, 81, 122, 160]。所有这些先前的界面都包含了**Roboxel**原则，该原则在*Robotic Graphics*[101]中被阐明。“*细胞机器人可以动态地将自己配置成所需的形状和大小*”。

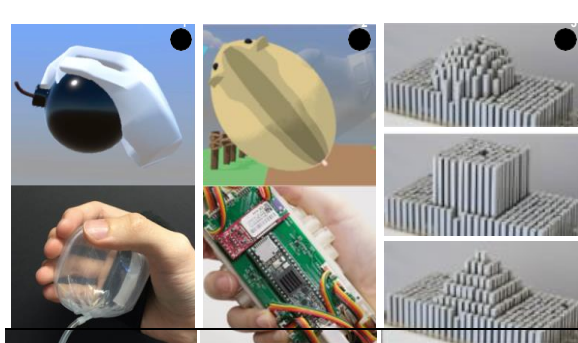


图3：模拟物体。(1) 在用户的手掌上有一个充气道具的控制器，模拟持有炸弹[153]。

(2) 一个基于针的界面，形状是一个球，在用户的手掌上进行互动，以复制一只仓鼠[185]。(3) 不同的基元（球、立方体、金字塔）显示在2.5D桌面上[138]。

6.1.3 对象基元, (图2-5)。最后, 用户可以与物体基元互动。这些基元代表了最简单的几何形状: 圆形、立方体、金字塔、圆柱体、环形。通过指尖简单地感觉到一个方向, 就可以提供所需的信息来理解一个物体的形状, 这是一个探索任务。因此, 具有不同方向的面板可以显示出来, 让用户在虚拟环境中探索各种物体[30] (图2-5), 或者直接在用户感兴趣的位置遇到他们[183, 184]。

相反，赤手空拳的操纵任务需要在手的附近同时有多个基元可用。这就是为什么需要利用真实物体的原因。

6.2 利用真实物体

被动触觉[73], 即使用被动道具, 包括在虚拟位置放置与其完全匹配的真实物体。Insko证明, 被动触觉技术增强了

虚拟环境[73]。然而,这确实有一个主要的局限性:用物理环境代替虚拟环境[135]需要对物体的形状、大小、纹理进行彻底的映射,并需要大量的道具[110]。例如,这可以用模拟室中的真实物体来完成(如飞机驾驶舱、摩托车),但需要实施更便宜的方法来促进它们在其他领域的使用。

6.2.1 对象基元, (图2-6)。一个解决方案是提取生理环境中已有的物体基元,在其上映射近似相同基元的虚拟物体[69] (图2-6)。

6.2.2 视觉-体感幻觉和伪触觉。环境中道具的数量也可以减少,同时让用户在物理世界的不同位置进行互动。有可能在触觉上利用视觉,修改用户的本体感觉来重新确定他们的轨迹[13, 56, 61, 82-84]。例如,一个用户可能会感知到多个不同的立方体,而一个立方体进行互动。在同样的原则下,用户的手部位移可以重新定向一个角度,向上/向下缩放[4, 21],或者放慢摩擦或重量感知[113, 125]。这些技术也允许对各种形状进行探索和操作:例如,可以添加模型,使复杂的虚拟形状能够映射到真实的物理物体边界上[189]。用户也可以被重新引导,从不同的位置捏取一个多原形物体(立方体、金字塔形和圆柱形),这在理论上拓宽了用一个道具的种类[40]。在同样的原则下,伪触觉允许在与物理道具互动时修改用户的形状[15, 16]或纹理[41]感知。

6.2.3 置换物体, (图2-7)。每当环境中出现物体时,就会有各种方向的物体被置换。这种位移可以将一个物理物体映射到多个物体上,也可以显示众多的道具。这些方向包含了**机器人图形学**[101]中的**机器人形状显示原则**。"一个机器人可以用末端执行器到达虚拟桌面的任何位置",并与用户感兴趣的对象相匹配。他们的可用性已经通过Wizard-of-Oz的实施得到了验证,人类操作者在一个房间规模的VR舞台上移动真实的物体甚至是人与用户相遇[31] (图4-2)。用户自己也可以重新配置和操作真实的道具[28]。

机器人形状显示器, RSDs, 也被称为**遇到型的触觉设备**,因为它们可以在用户感兴趣的物体上与用户相遇,提供触觉反馈。它们可以展示真实的材料[5, 11],模拟墙壁的物理道具[24, 80, 178],甚至可以展示家具[148]或不连贯的物体。[24, 64, 65, 72],它们可以相互影响。

7 孕育成本

在实践中,设计师必须在构思阶段权衡他们的交互设计空间与实施和操作成本。实施成本包括与触觉解决方案的可接受性有关的技术方面,如安全性、坚固性和易用性[42]。例如,有作用的触觉解决方案需要

关于这个标准,要特别注意。操作成本包括使用触觉解决方案的财务和人力成本。财务成本是通过触觉设备和其他元素的成本来衡量的,如精确跟踪用户手部的运动捕捉系统或事先准备所需的道具。人力成本是指在用户互动过程中所需要的劳动时间和人力操作人员的数量。例如,驱动的触觉解决方案通常不需要人类操作(低人力成本),但可能在机械上很昂贵。

在本节中,我们使用我们的二维设计空间(表1),根据其构思成本讨论触觉解决方案。由于非交互式解决方案在全球范围内共享相同的方法,并具有较低的实施成本,我们在"无机器人"小节中一起讨论它们。

7.1 没有机器人

关于实施成本,所有的非交互式触觉解决方案都是安全、坚固和易于使用的。我们在这里描述了在选择这些解决方案时的一个重要的设计选择:要么设计者依靠**图形解决方案**,利用视觉线索而不是触觉线索,要么需要**操作者**位移或改变可互动的道具(见表1)。

7.1.1 被动道具。被动道具[73]只包括在虚拟位置上放置与之完全匹配的真实物体。它们提供了一种通过物体的自然承受力进行交互的自然方式[107]。然而,它们被限制在场景中的可用物体上,因为它们没有被驱动。它们只能在基于场景的体验中使用,而目标是预先知道的。因此,环境需要为每个可用的虚拟物体提供一个道具。

7.1.2 形状模拟、伪触觉、视触觉幻觉、物体基元。对于图形解决方案,用户被重新引导到他们感兴趣的对象[13],使用视觉-触觉幻觉。然而,在虚拟物体上物理覆盖一个道具或基元有一个跟踪成本,这通常依赖于跟踪器,其操作成本很高(例如Optitrack[108]或HTC跟踪器)。

否则,用户的意图必须被预测,才能发生交互作用。然后,用户的手会被重新定向到适当的无动作的道具上,以便他们探索自己感兴趣的对象[30]。在操作上,成本只依赖于代理制造(图2-5)。这些实现在互动方面提供了各种方案(甚至是非决定性的),而且成本合理。

7.1.3 表面触觉显示器。这些技术专门允许通过多种触觉特征(如摩擦或纹理)进行探索。它们还可以整合一个平板电脑或智能手机[128],用户可以在上面进行任何位置的互动。

7.1.4 人类执行器。这项技术包括使用人类操作者在VR舞台上移动道具。然而,设计师们遇到了这些操作者的可靠性和速度问题。即使他们只用于基于场景的体验,也需要实施基于图形的**延迟机制**[31] (图4-2)来克服这些问题。从概念上讲,它们扩大了交互范围,然而这种解决方案在操作上是非常昂贵的。



图4：致动程度。(1) 没有驱动力。用户的手被重新引导去触摸一个不能移动的被动道具[13]。这项技术的实现完全依赖于利用视觉线索的软件开发。

(2) 人类执行者被用来用绿野仙踪的技术[31]来说明机器人图形[101]的原理。他们携带着道具，让用户感受到真实的连续墙；遇到型的触觉设备（3-5）：(3) 一架无人机遇到用户的手，用于探索被动的道具；(4) 一个卡特尔机器人自主位移，让用户与物理道具互动[24]；(5) 一个具有多个自由度的机械臂位移自己，遇到用户的手，并旋转其形状接近装置，提供合适的材料[11]。

7.1.5 真实道具的重新分配。不使用被动道具的跟踪系统，而是使用深度摄像机，例如，允许将道具重新分配给同一基体的不同虚拟对象[69]（图2-6）。因此，这些对象都是可以交互的。这极大地降低了操作成本，因为它们只依赖于计算机视觉。这使得非决定性的场景成为可能，因为现实世界实际上被替换成了虚拟世界[135]，物体可以通过虚拟：物理[65]的映射被重新分配。

7.2 机器人技术与无真实物体

本节收集了通过执行来模拟虚拟环境的技术：它们复制了虚拟环境来约束用户。

7.2.1 桌面触觉界面。SPIDAR[127]、Virtuose [62]和其他经典的桌面触觉界面已经在多项调查进行了比较[42, 132, 168]（见图2 - 1）。它们是安全的，因为它们是由用户控制的，只用运动反馈来约束他们的手臂运动，并适应虚拟场景中的任何可用物体（非确定性场景）。它们显示出很高的感知硬度和稳健性，但仍然非常昂贵（>10k\$）。

7.2.2 形状改变的界面，Roboxels, 2.5D Tabletops。这些技术呈现出较高的感知硬度，并随着虚拟环境的变化而相应改变其形状[47, 91]。因此，它们不需要任何操作者，只要它们的位移被启用，就可以实现非决定性的场景[138]（见图3-3）。然而，它们的建造很复杂，需要多个电机，因为它们是由许多针脚组成的阵列，这决定了它们的触觉逼真度的分辨率。尽管它们呈现出高电压，但它们在用户周围仍然是安全的。由于它们需要赤手空拳的互动，因此它们显示出很高的易用性。

7.2.3 可穿戴设备、控制器、EMS...这些都是依靠小的扭矩，足以约束用户的身体部位。它们是安全的，易于使用，但反过来却不够坚固，无法抵御用户的行动。由于它们在不断地改变用户的触觉

感知，他们确实允许非决定性的场景，并随着与虚拟道具的距离而改变其渲染的硬度和刚度[39, 85]。定制的控制器的通常依赖于3D打印的部件和小型伺服电机，可以很容易地复制[146]（图2-2,3；图3-1,2）。

7.2.4 中空触觉技术。中空触觉技术提供了非接触式的互动，也为用户提供了高水平的安全。然而，它们不允许在VR环境中导航，因此不能考虑非确定性的情况。它们的稳健性很低，因为它们向用户发送超声波，并不对他们进行物理约束[117]。

7.2.5 可充气地板。地板的拓扑结构可以被修改和充气，以创造身体尺度上的互动[154]。用户不能给它们充气，但是他们可以把一些地砖往下推，因此可以编辑它们。这些都是安全的，尽管它们没有提供广泛的互动，但提供了多种静态的身体姿势。

7.3 机器人与真实物体

在本小节中，我们将详细介绍表1中提到的不同类型的机器人形状显示器——也就是所谓的“遭遇型触觉装置”。首先，这些界面会移动到用户面前：这一特点优化了它们的使用便利性。其次，由于这些界面是在用户附近移动的，因此在这一节中提出了安全问题，这取决于界面的坚固程度。遭遇型的触觉设备结合了不同类型的交互技术：它们可以为用户提供被动的道具、纹理或基元，并允许导航、探索、操纵等任务。它们的机械实现提供了良好的可重复性和可靠性。

7.3.1 笛卡尔机器人。在[24]中，CoVR，一个安装在笛卡尔XY天花板机器人上的物理柱子可以在房间规模的VR竞技场的任何高度和任何位置进行互动（见图1 - 2；图4 - 4）。这种实现方式呈现出较高的感知刚度，并且由于它在竞技场周围携带被动道具，因此能够实现

高保真触觉渲染。它显示了高精度和速度, 并提出了一种算法, 将柱子的位移作为用户意图的一个函数进行优化。因此, 它可以实现非确定性的场景。安全措施已经在现场得到了验证。在实践中, 柱子的速度在用户周围不断下降, 因为它被后者所排斥。它的软件实现确保了一个安全的环境, 使用户能够在竞技场上漫步而不发生意外碰撞。然而, 为了在不同的场景中展示许多道具, 需要操作员创建面板并对其进行修改。然而, 材料仍然很便宜, 即使它的结构和电机比3D打印的外壳和伺服电机更昂贵, 例如按照定制的控制器, 这种解决方案提供了广泛的互动。

7.3.2 机器人手臂。与以前的直角坐标机器人相比, 机械臂提供了更多的自由度。这主要意味着更高的成本和更高的安全风险。例如, H-Wall使用库卡LBR Iiwa机器人, 呈现出高的电机扭矩, 因此会增加用户周围的安全风险。因此, 这种实现方式不允许出现非决定性的情况, 并向用户展示一堵墙或一扇旋转门, 具有很高的稳定性。扭矩较小的实现方式, 如[11, 166], 更安全, 但显示出较低的感知刚度。因此, 所有这些互动的用例都有很大的不同: H-Wall模拟的是一堵刚性的墙, 而VRRobot[166]和Snake Charmer[11] (图4-5) 提供了更多的互动机会。后者也是唯一能自主改变其末端执行器的机器人形状显示器, 无需操作者。

7.3.3 无人机、蜂群机器人、移动平台。对于无人机, 互动仅限于可用的道具, 例如在给定的位置与一堵墙的互动[178]。从主动模式 (飞行) 到被动模式 (用户可抓取) 有一个很长的延迟 (10秒) [5], 除了安全问题外, 还不允许出现非确定性的场景。然而, [159]允许用户改变无人机的轨迹, 以获取和磁性恢复感兴趣的物体。与之前的接地界面相比, 它们的精度和速度都是有限的[54, 122], 并且需要动态重定向技术来提高它们的性能[5]。由于它们没有接地, 它们没有高的鲁棒性, 也没有可感知的刚性。这也适用于移动机器人, 例如[55, 65], 它们只显示被动的道具。为了降低构思成本, 在[170, 181]中使用了现有的吸尘机器人作为移动平台。设计者可以选择复制它们, 作为蜂群机器人, 以实现非决定性的场景[148]。这些机器人在用户周围使用是安全的, 因为它们的速度和坚固性是有限的。也可以设计一个旋转木马平台来代替蜂群移动界面, 在与用户等距的位置展示各种道具[72]。所有之前的界面都需要在其机械和软件的基础上增加操作者的成本, 以根据使用情况修改可用的可交互道具。相反, [190]提出了自主的可重新配置的界面, 将机器人形状显示器和机器人像素交织在一起。

[101]原则来摆脱操作者的成本 (见图1-4)。这些小的机器人体积元素可以将自己重新组合成用户感兴趣的物体。它们有足够的感知硬度来代表物体, 但不够坚固, 无法抵御身体规模的力量, 例如模拟刚性的墙。

8 评估协议

除了在概念和交互机会之间进行不同的权衡之外, 设计师还需要选择一个评估协议。这些协议取决于VR的使用情况。例如, 医疗或工业装配培训的触觉效益可以根据真实的体验条件进行评估[112], 其标准包括完成时间、错误数量、用户认知负荷等[59]。相反, 游戏体验的触觉益处更有可能通过沉浸感和临场感来评估, 比较 "有/无触觉" 条件[31]。尽管有些论文确实比较了多种触觉显示[44, 161], 但我们指出缺乏参考的评估协议来评估VR中的触觉解决方案。

8.1 目前的参考评价方法

在VR中最常见的评估方法是SUS或WS存在感问卷[140, 175]。这些问卷主要关注图形渲染, 只有两个李克特量表问题真正关注触觉反馈。"你能在多大程度上使用触摸来主动调查VE?" 和 "你能在多大程度上操纵VE中的物体?"。此外, 上述大多数技术都是针对 "无触觉反馈" 进行评估的, 因此评估结果可能会有偏差, 而且最重要的是, 评估结果是 *预期的*。这就解释了为什么一些实施方案提供了问卷的单一部分的结果, 或者任意地将他们的结果与新的子部分 (如 "检查/行动的能力") 或特定的任务问题 (如 "感受不同质地的真实性如何") 相结合[34]。

8.2 评价建议

触觉应该被更多地纳入到[175]中的不同因素中 ("控制、感觉、分心、真实感")。在这个方向上, Kim等人定义了 *触觉体验模型*[78], 他们同时考虑到了设计者和用户的体验。它描述了设计参数 ("及时性、强度、密度和音色") 如何影响可用性要求 ("实用性、因果性、连贯性、突出性") 和用户方面的目标体验维度 ("和谐性、表现力、自律性、沉浸感、真实感")。

在同样的方面, 我们提出了额外的指导方针来评估VR实验中的触觉解决方案 (见表2)。我们认为, 不同的互动机会元素应该被添加到 *用户控制参数* 中。

在 *感官因素* 中, 应增加可用的 **触觉特征的数量** (如形状、质地、摩擦、温度), 并与它们的质量相一致, 即 "及时性、强度、密度和时间"。可用性要求应该 **确定** 所提出的解决方案的 **使用情况和场景数量**。因此, 对界面的及时性和可用性的良好评估应该预见未来的部署, 避免不必要的发展。

9 例子。遇到的触觉设备的类型

我们在本节中提议比较四种遇到的触觉设备。Beyond the Force (BTF) 无人机[5] (图4-3), ShapeShift[138] (图3-3), Snake Charmer[11] (图4-5) 和CoVR[24] (图4-4)。


| | Navigation Workspace | Haptic Features | Exploration | Manipulation | Edition | Whole-Body Involvement | Non- Deterministic Scenarios | Number of Props | Passive Haptics | Operator | Deployment Use-cases | Robustness | Accuracy Speed | Safety | Ease-of-Use | Evaluation Method |
|---------------|-------------------------|--------------------|-------------|--------------|---------|---------------------------|------------------------------------|---|--------------------|----------|-------------------------|------------|-------------------|--------|-------------|----------------------|
| 超越原力 | 2 m ³ | ++ | ++ | + | - | - | - | 使用前的准备工作 | 是 | 是 | / | - | - | - | +++ | 噪声和恐惧的接受 |
| 移形换影的 蛇蝎美人 | 桌面 | + | +++ | + | + | - | ++ |  | 没有 | 没有 | 三维地貌 体积测量数据 | ++ | + | +++ | +++ | 形状识别 |
| 协同工作 | 桌面 | +++ | +++ | ++ | - | - | ++ | 使用前的准备工作 | 是 | 没有 | 培训 | + | + | ++ | +++ | 没有正式的评估 |
| | 30 m ³ | +++ | +++ | +++ | - | +++ | +++ | 使用前的准备工作 | 是 | 是 | 拱廊培训 | +++ | ++ | + | +++ | 用户的 |

表2：根据 "评价部分" 的参数，对4种遇到的触觉设备进行比较和评价。

就互动和道具的数量而言，无人机是最有限的一种。事实上，由于安全和执行方面的限制，它只能在一个缩小的工作空间内实现自由导航。它也允许探索（通过纹理）和操纵任务。然而，由于BTF还不能处理大的嵌入质量，操纵任务目前只限于单个轻质物体。无论何时被抓住，由于它的推力和惯性，它在交互过程中不提供触觉的透明度[63]。为了让用户执行不同的任务，操作员需要手动改变无人机的配置。它的机械实现不能为非确定性场景中的虚拟道具叠加提供足够的速度，但它的精确度也不能令人满意，需要动态重定向技术才能发生互动。它还提供了不需要的噪音和风，这降低了交互的真实性。

ShapeShift[138]则截然不同：它是一个可以自我替换的2.5D桌面界面。即使理论上无人机可以在无限的工作空间中使用，但在实践中，他们确实分享了大致相同的空间。由于[138]依靠的是一个形状变化的界面，不需要操作者，在非决定性的情况下，它可以改变自己的形状来叠加用户感兴趣的虚拟物体。它允许在桌面上的自由导航，以及双臂的操作和探索。这两种设备的触觉透明度都是有限的，因为它们是没有基础的解决方案。我们相信，ShapeShift可以通过将用户的用力行为与被驱动的销子的硬度同步来更新，以实现版本任务。在触觉功能方面，它模拟了形状，并刺激了触觉和动觉的线索。与所有2.5D平板电脑一样，它可以用于各种应用。三维地形探索、体积数据等。它的分辨率似乎很有希望，因为其研究显示了成功的物体识别和触觉搜索。同样的交互方式在桌面上也可以用Snake Charmer[11]，它提供了广泛的道具和刺激，因为它的每个末端执行器都包括6个面，有各种交互机会（可以探索纹理，可以按按钮，可以感知温度的加热器和风扇，可以抓住和操纵的手柄和灯泡...）。它还可以使用磁铁自主地改变其形状近似装置，SAD（即其末端执行器）。它跟随用户的手，在互动之前确定其SAD的预期互动面：因此它可以实现非确定性的场景。此外，Snake Charmer在其部署方面有一个很好的前景。LobbyBot[1]，已经进入雷诺工业研究实验室，以实现汽车工业的VR触觉反馈。最后，CoVR[24]实现了最大的工作空间以及最高的互动范围。用户可以自由地在一个

30 m³ VR竞技场，CoVR预测并在互动前物理地叠加他感兴趣的对象。这些互动包括触觉探索、操纵无系的物体（完全触觉透明）、身体姿势。事实上，CoVR足够强大，可以抵御身体比例的用户，并显示出超过100N的感知硬度，可以携带超过80公斤的嵌入式质量。CoVR还可以启动与用户的互动，并且足够强大，可以带领用户通过力量甚至运送他们。此外，通过适当的物理：虚拟映射[65]，一个物理道具可以在没有重定向技术的情况下叠加多个相同的近似原始的虚拟道具。然而，它需要一个操作者在其侧面创建、组装和显示面板。

房间规模的VR变得越来越有意义，而Snake Charmer可以从连接到CoVR这样的界面中受益。同样，将CoVR与像Snake Charmer那样自主改变其SAD的机械臂或与改变形状的界面交织在一起，可以降低其运行成本。这将显示出机器人图形学概念的所有能力。

10 结论

我们在本文中分析了VR中的触觉交互及其相应的触觉解决方案。我们从用户和设计者的角度分析了它们，考虑了交互机会和视觉-触觉的一致性，以及实施和操作成本。我们提出了一个新的框架来对触觉显示进行分类，通过两个维度的设计空间：界面的物理性程度和驱动程度。

然后，我们从交互和概念的角度评估了这些解决方案。在实施方面，我们评估了界面的稳健性、易用性以及安全方面的考虑。从操作的角度，我们也评估了所提出的解决方案的成本。

这项调查强调了触觉解决方案在VR中可能提供的各种道具、任务和触觉功能。这项调查可以用来分析评估现有的触觉交互方式。它也可以帮助VR设计者根据他们的需求（任务、工作空间、用例等）选择理想的触觉交互和/或触觉解决方案。

我们认为，结合多种触觉解决方案有利于用户体验，因为它优化了上述标准。遇到的触觉界面随后被强调，因为它们已经结合了多种交互技术：它们在潜在的大型VR舞台上取代了被动的道具，并允许多任务，如导航、探索、操纵，甚至允许用户与之交互。

参考文献

- [1] [n.d.].雷诺公司. <https://www.clarte-lab.fr/component/tags/tag/renault>
- [2] 2019.CyberGrasp. <http://www.cyberglovesystems.com/cybergasp>
- [3] 2019.Teslasuit I 用于动作捕捉和训练的全身触觉VR服. <https://teslasuit.io/>
- [4] Parastoo Abtahi and Sean Follmer.2018.用于提高形状显示器感知性能的视觉-触觉幻觉.在2018年CHI计算系统中人的因素会议论文集--CHI '18. ACM出版社.
- [5] Parastoo Abtahi, Benoit Landry, Jackie (Junrui) Yang, Marco Pavone, Sean Follmer, and James A. Landay.2019.超越力量.使用四旋翼飞机为虚拟现实中的触摸技术适用对象和环境.在2019年CHI计算系统中的人的因素会议的论文集中.
- [6] Merwan Achibet, Adrien Girard, Anthony Talvas, Maud Marchal, and Anatole Lecuyer.2015.Elastic-Arm : 人类规模的被动触觉反馈, 用于增强虚拟环境中的交互和感知.在2015年IEEE虚拟现实(VR). IEEE, Arles, Camargue, Provence, France, 63-68. <https://doi.org/10.1109/VR.2015.7223325>
- [7] Merwan Achibet, Benoit Le Gouis, Maud Marchal, Pierre-Alexandre Leziart, Ferran Argelaguet, Adrien Girard, Anatole Lecuyer, and Hiroyuki Kajimoto.2017.FlexiFingers:结合被动触觉和伪触觉的VR中的多指交互. In 2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI).IEEE.
- [8] Merwan Achibet, Maud Marchal, Ferran Argelaguet, and Anatole Lecuyer.2014.虚拟手套.一种利用握力对物体进行视觉触觉操作的新型交互范式.在2014年IEEE三维用户接口研讨会(3DUI)上.
- [9] Dmitry Alexandrovsky, Susanne Putze, Michael Bonfert, Sebastian Höffner, Pitt Michelmann, Dirk Wenig, Rainer Malaka, and Jan David Smeddinc.2020.考察VR用户研究中问卷的设计选择.在2020年CHI计算系统中人的因素会议的论文集中. ACM, 美国夏威夷火奴鲁鲁, 1-21. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376260>
- [10] E.Amirpour, M. Savabi, A. Saboukhi, M. Rahimi Gorii, H. Ghafarirad, R. Fesharakifard, and S. Mehdi Rezaei.2019.用于触觉应用的多方位手部外骨骼的设计和優化.在2019年第七届国际机器人和机电一体化会议(ICRoM)上. 270-275. <https://doi.org/10.1109/ICRoM48714.2019.9071884> ISSN: 2572-6889.
- [11] Bruno Araujo, Ricardo Jota, Varun Perumal, Jia Xian Yao, Karan Singh, and Daniel Wigdor.2016.蛇蝎美人.物理启用的虚拟对象.在《TEI'16 : 第十届有形、嵌入式和具身交互国际会议--TEI'16》中. ACM Press, Eindhoven, Netherlands, 218-226. <https://doi.org/10.1145/2839462.2839484>
- [12] Jonas Auda, Max Pascher, and Stefan Schneegass.2019.环绕(虚拟)世界.在虚拟现实中使用肌肉电刺激进行无限的行走.在2019年CHI计算机系统中人的因素会议论文集--CHI '19. ACM Press, Glasgow, Scotland Uk, 1-8. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300661>
- [13] Mahdi Azmandian, Mark Hancock, Hrvoje Benko, Eyal Ofek, and Andrew D. Wilson.2016.触觉重定位.被动触觉的动态再利用以增强虚拟现实体验.在2016年CHI计算系统中人的因素会议论文集--CHI '16. ACM出版社, 圣克拉拉. 美国加州, 1968-1979年. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858226>
- [14] Marc Baloup, Veis Oudjail, Thomas Pietrzak, and Géry Casiez.2018.虚拟现实中间目标的指向技术.在30届人机交互会议论文集-IHM '18. ACM出版社, 法国布雷斯特, 100-107. <https://doi.org/10.1145/3286689.3286696>
- [15] Y.Ban, T. Kajinami, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose.2012.使用伪触觉效果修改已识别的曲面形状.在2012年IEEE触觉技术研讨会(HAPTICS)上. 211-216. <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2012.6183793>
- [16] Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose.2012.使用伪触觉效果修改边缘形状的识别位置.在18届ACM虚拟现实软件和技术研讨会上发表.
- [17] Gareth Barnaby和Anne Roudaut. 2019.Mantis : 构建多形式力反馈系统的可扩展、轻量级和可访问架构.在32届ACM用户界面软件和技术研讨会论文集--UIST '19. ACM Press, New Orleans, LA, USA, 937-948. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347909>
- [18] Olivier Bau, Ivan Poupyrev, Ali Israr, and Chris Harrison.2010.TeslaTouch : 触摸表面的电振动.在23届ACM用户界面软件和技术年度研讨会论文集--UIST '10. ACM Press, New York, New York, USA, 283. <https://doi.org/10.1145/1866029.1866074>
- [19] Hrvoje Benko, Christian Holz, Mike Sinclair, and Eyal Ofek.2016.NormalTouch和TextureTouch : 手持虚拟现实控制器上的高保真3D触觉形状渲染.在29届用户界面软件和技术年度研讨会论文集--UIST '16. ACM出版社, 日本东京, 717-728. <https://doi.org/10.1145/2984511.2984526>
- [20] Leif P. Berg和Judy M. Vance. 2017.行业在产品设计和制造中对虚拟现实的使用 : 一项调查. Virtual Reality 21, 1 (March 2017), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0293-9>
- [21] Joanna Bergström, Aske Mottelson, and Jarrod Knibbe.2019.在VR中调整抓取 : 估计物体识别的阈值.在32届ACM用户界面软件和技术年度研讨会上. ACM, New Orleans LA USA, 1175-1183. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347939>
- [22] A.Bloomfield, Yu Deng, J. Wampler, P. Rondot, D. Harth, M. McManus, and N. Badler.2003.拆卸任务的触觉动作的分类和比较.在IEEE Virtual Reality, 2003. 论文集. IEEE Comput.Soc, Los Angeles, ca, usa, 225-231. <https://doi.org/10.1109/VR.2003.1191143>
- [23] Mette Boldt, Boxuan Liu, Tram Nguyen, Alina Panova, Ramneek Singh, Alexander Steenbergen, Rainer Malaka, Jan Smeddinc, Michael Bonfert, Inga Lehne, Melina Cahnbley, Kim Korsching, Ioannis Bikas, Stefan Finke, Martin Hanci, and Valentin Kraft.2018.You Shall Not Pass:带有房间尺度映射的VR环境中的虚拟墙的非侵入性反馈. In 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR).IEEE, Reutlingen, 143-150. <https://doi.org/10.1109/VR.2018.8446177>
- [24] Elodie Bouzbib, Gilles Bailly, Sinan Haliyo, and Pascal Frey.2020.CoVR : 用于VR中非决定性场景的大规模力反馈机器人界面.在33届ACM用户界面软件和技术年度研讨会上. ACM, 美国虚拟活动, 209-222. <https://doi.org/10.1145/3379337.3415891>
- [25] D.A. Bowman和C.A. Wingrave. 2001.沉浸式虚拟环境的菜单系统的设计和评估. In Proceedings IEEE Virtual Reality: 2001.IEEE Comput.Soc, Yokohama, Japan, 149-156. <https://doi.org/10.1109/VR.2001.913781>
- [26] 史蒂夫·布赖森. 2005.虚拟现实中的直接操纵. In Visualization Handbook.Elsevier, 413-430. <https://doi.org/10.1016/B978-012387582-2/50023-X>
- [27] Lung-Pan Cheng.2019.VRoamer:在大型未知的真实世界建筑环境内行走时生成即时的VR体验. (2019), 8.
- [28] Lung-Pan Cheng, Li Chang, Sebastian Marwecki, and Patrick Baudisch.2018年, iTurk : 通过让用户在虚拟现实重新配置道具将被动触觉变成主动触觉.在2018年CHI计算系统中人的因素会议的论文集--CHI '18. ACM Press, Montreal QC, Canada, 1-10. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173663>
- [29] Lung-Pan Cheng, Patrick L hne, Pedro Lopes, Christoph Sterz, and Patrick Baudisch.2014.Haptic Turk : 一个基于人的运动平台. (2014), 11.
- [30] Lung-Pan Cheng, Eyal Ofek, Christian Holz, Hrvoje Benko, and Andrew D. Wilson.2017.Sparse Haptic Proxy:在虚拟环境中使用一般被动道具的触摸反馈.在2017年CHI会议上, 计算系统中的人的因素--CHI '17. ACM出版社, 科罗拉多州丹佛. 美国, 3718-3728. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025753>
- [31] Lung-Pan Cheng, Thijs Roumen, Hannes Rantzsch, Sven K hler, Patrick Schmidt, Robert Kovacs, Johannes Jasper, Jonas Kemper, and Patrick Baudisch.2015.TurkDeck:基于人的物理虚拟现实.见《第28届ACM用户界面软件与技术年度研讨会论文集--UIST '15》. ACM Press, Daegu, Kyungpook, Republic of Korea, 417-426. <https://doi.org/10.1145/2807442.2807463>
- [32] Inrak Choi, Heather Culbertson, Mark R. Miller, Alex Olwal, and Sean Follmer.2017.Grabity.用于模拟虚拟现实中的重量和抓取的可穿戴触觉界面.在30届ACM用户界面软件和技术研讨会论文集--UIST '17. ACM出版社, QC, Québec市. 加拿大, 119-130. <https://doi.org/10.1145/3126594.3126599>
- [33] Inrak Choi, Elliot W. Hawkes, David L. Christensen, Christopher J. Ploch, and Sean Follmer.2016.Wolverine:一个用于在虚拟现实中的抓取的可穿戴触觉界面.在2016年IEEE/RSJ智能机器人和系统国际会议(IROS)上. IEEE, Daejeon, South Korea, 986-993. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759169>
- [34] Inrak Choi, Eyal Ofek, Hrvoje Benko, Mike Sinclair, and Christian Holz.2018.CLAW : 一个用于在虚拟现实中的抓取、触摸和触发的多功能手持触觉控制器.在2018年CHI计算系统中人的因素会议的论文集--CHI '18. ACM Press, Montreal QC, 加拿大, 1-13. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174228>
- [35] Timothy R. Coles, Dwight Meglan, and Nigel W. John.2011.触觉技术在医学培训模拟器中的作用.艺术状态的调查. <https://doi.org/10.1109/TOH.IEEE.Transactions.on.Haptics.4.1.Jan.2011>, 51-66. 2010.19
- [36] Fabien Danieau, Julien Fleureau, Philippe Guillotel, Nicolas Mollet, Anatole Lécuyer, and Marc Christie.2012.HapSeat : 用嵌入座椅的多个力反馈装置产生运动感觉.在18届会议论文集

- ACM虚拟现实软件和技术研讨会 - VRST '12. ACM Press, Toronto, Ontario, Canada, 69. <https://doi.org/10.1145/2407336.2407350>
- [37] Fabien Danieau, Philippe Guillotel, Olivier Dumas, Thomas Lopez, Bertrand Leroy, and Nicolas Mollet.2018.HFX工作室：用于全身im-mersive体验的触觉编辑器。在 *第24届ACM虚拟现实软件和技术研讨会论文集-VRST '18*。ACM出版社, 日本东京, 1-9. <https://doi.org/10.1145/3281505.3281518>
- [38] Bruno R. De Araújo, Géry Casiez, Joaquim A. Jorge, and Martin Hachet.2013.Mockup Builder.在表面和上面进行3D建模。 *计算机与图形* 37, 3 (May 2013), 165-178. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2012.12.005>
- [39] Xavier de Tinguy, Thomas Howard, Claudio Pacchierotti, Maud Marchal, and Anatole Lécuyer.2020.WeATaViX: Wearable Actuated TAngibles for Virtual reality eXperiences.(2020), 9.
- [40] Xavier de Tinguy, Claudio Pacchierotti, Maud Marchal, and Anatole Lécuyer.2019.迈向通用有形物体。优化3D交互中的触觉捏合感。在 *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*.IEEE, Osaka, Japan, 321-330. <https://doi.org/10.1109/VR.2019.8798205>
- [41] Donald Degraen, André Zenner, and Antonio Krüger.2019.使用3D打印的头发结构增强虚拟现实中的纹理感知。在 *2019年CHI计算系统中人的因素会议的论文集-CHI'19*。ACM Press, Glasgow, Scotland UK, 1-12. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300479>
- [42] Lionel Dominjon, Jérôme Perret, and Anatole Lécuyer.2007.人类尺度触觉的新设备和交互技术。 *The Visual Computer* 23, 4 (March 2007), 257-266. <https://doi.org/10.1007/s00371-007-0100-4>
- [43] Frederick Ducatelle, Gianni A.Di Caro, Carlo Pinciroli, and Luca M. Gambardella.2011.机器人之间的自组织合作。 *Swarm Intelligence* 5, 2 (June 2011), 73-96. <https://doi.org/10.1007/s11721-011-0053-0>
- [44] David Escobar-Castillejos, Julieta Noguez, Luis Neri, Alejandra Magana, and Bedrich Benes.2016.带触觉设备的医学培训模拟器的回顾。 *医疗系统杂志* 40, 4 (2016年4月), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0459-8>
- [45] Cathy Fang, Yang Zhang, Matthew Dworman, and Chris Harrison.2020.Wire-ality:通过佩戴 多线触觉技术在虚拟现实实现复杂的有形几何图形。(2020), 10.
- [46] Martin Feick, Scott Bateman, Anthony Tang, André Miede, and Nicolai Marquardt.2020.TanGi:*arXiv:2001.03021 [cs]* (Jan. 2020). <http://arxiv.org/abs/2001.03021> *arXiv: 2001.03021*.
- [47] Daniel Fitzgerald和Hiroshi Ishii. 2018.Mediate:一个用于混合现实的空间有形界面。在 *2018年CHI计算系统中人的因素会议的扩展摘要中*。ACM, Montreal QC Canada, 1-6. <https://doi.org/10.1145/3170427.3188472>
- [48] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii.2013年, inFORM:通过形状和物体驱动的动态物理负担和约束。载于 *第26届ACM用户界面软件和技术年度研讨会论文集-UIST '13*。ACM出版社, 苏格兰圣安德鲁斯, 417-426. <https://doi.org/10.1145/2501988.2502032>
- [49] A.Formaglio, A. Giannitrapani, M. Franzini, D. Prattichizzo, and F. Barbagli.2005.移动触觉界面的性能。在 *第44届IEEE决策与控制会议上*。8343-8348. <https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1583513>
- [50] Ilja Frissen, Jennifer L. Campos, Manish Sreenivasa, and Marc O. Ernst.2013.启用不受约束的全方位步行通过虚拟环境。CyberWalk项目的概述。在 *《虚拟环境中的人类行走。感知、技术和应用》*, Frank Steinicke, Yon Visell, Jennifer Campos和Anatole Lécuyer (编者)。Springer, New York, NY, 113-144. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8432-6_6
- [51] Markus Funk, Florian Müller, Marco Fendrich, Megan Shene, Moritz Kolvenbach, Niclas Dobbertin, Sebastian Günther, and Max Mühlhäuser.2019.使用曲线轨迹评估具有方向指示的虚拟现实的点和远距运动的准确性。在 *2019年CHI计算系统中人的因素会议的论文集-CHI'19*。ACM Press, Glasgow, Scotland UK, 1-12. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300377>
- [52] Thomas Galais, Alexandra Delmas, and Rémy Alonso.2019.虚拟现实中的自然交互：对认知负荷的影响。In *Proceedings of the 31 Conference on l'Interaction Homme-Machine Adjunct - IHM '19*.ACM Press, Grenoble, 法国, 1-9. <https://doi.org/10.1145/3366551.3370342>
- [53] Péter Galambos.2012.触觉和远程操纵的振动触觉反馈。调查、概念和实验 *Acta Polytechnica Hungarica* 9, 1 (2012), 25.
- [54] Antonio Gomes, Calvin Rubens, Sean Braley, and Roel Vertegaal.2016.比特-无人机。争取将3D纳米直升机显示器作为交互式自浮动可编程物质使用。在 *2016年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI'16*。ACM出版社, 加州圣克拉拉, 美国, 770-780. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858519>
- [55] Eric J. Gonzalez, Parastoo Abtahi, and Sean Follmer.2020.REACH+:通过在VR中的动态重定向, 提高相遇型触觉设备的可达性。在 *第33届ACM年度研讨会论文集* 中关于用户界面软件和技术。ACM, Virtual Event USA, 236-248. <https://doi.org/10.1145/3379337.3415870>
- [56] Eric J. Gonzalez和Sean Follmer. 2019.调查虚拟现实双手触觉重定向的检测。在 *第25届ACM虚拟现实软件和技术研讨会 - VRST '19*。ACM Press, Parramatta, NSW, Australia, 1-5. <https://doi.org/10.1145/3359996.3364248>
- [57] 顾晓琪, 张逸飞, 孙伟泽, 边远哲, 周道, 和Per Ola Kris-tensson。2016.Dexmo:用于VR中运动捕捉和力反馈的廉价和轻量级机械外骨骼。在 *2016年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '16*。ACM Press, Santa Clara, California, USA, 1991-1995. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858487>
- [58] Jan Gugenheimer, Dennis Wolf, Eythor R. Eiriksson, Pattie Maes, and Enrico Rukzio.2016.GyroVR:使用头戴式飞轮模拟虚拟现实中的惯性。在 *第29届用户界面软件和技术年度研讨会的论文集* 中。ACM, 日本东京, 227-232. <https://doi.org/10.1145/2984511.2984535>
- [59] T.Gutiérrez, J. Rodriguez, Y. Velaz, S. Casado, A. Suescun, and E. J. Sanchez.2010.IMA-VR:用于工业维护和装配任务技能转移的多模态虚拟培训系统。 *第19届机器人与人类互动交流国际研讨会* (2010)。 http://www.academia.edu/15623406/IMA_VR_A_multimodal_virtual_training_工业维修和装配任务中的技能转移系统
- [60] Sebastian Günther, Dominik Schön, Florian Müller, Max Mühlhäuser, and Martin Schmitz.2020.PneumoVolley.通过气动驱动对头部进行基于压力的触觉反馈。(2020), 10.
- [61] Dustin T. Han, Mohamed Suhail, and Eric D. Ragan.2018.评估虚拟现实与被动触觉技术的手部互动的重映射物理触觉角。 *IEEE视觉化和计算机图形的交互* 24, 4 (2018年4月), 1467-1476. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2794659>
- [62] Haption.2019.Virtuose™ 6D - HAPTION 5A. <https://www.haption.com/en/products-en/virtuose-6d-en.html>
- [63] Vincent Hayward和Karon Maclean. 2007.自己动手做触觉：第一部分。 *IEEE机器人与自动化杂志* 14, 4 (2007年12月), 88-104. <https://doi.org/10.1109/M-RA.2007.907921>
- [64] Zhenyi He, Fengyuan Zhu, Aaron Gaudette, and Ken Perlin.2017.用于协作式虚拟现实的机器人触觉代理。 *arXiv:1701.08879 [cs]* (Jan. 2017). <http://arxiv.org/abs/1701.08879> *arXiv: 1701.08879*.
- [65] Zhenyi He, Fengyuan Zhu, and Ken Perlin.2017.PhyShare:分享虚拟现实中的物理交互。 *arXiv:1708.04139 [cs]* (2017年8月)。 <http://arxiv.org/abs/1708.04139> *arXiv: 1708.04139*.
- [66] Richard M. Held和Nathaniel I. Durlach. 1992.Telepresence.Presence:Teleoperators and Virtual Environments 1, 1 (Jan. 1992), 109-112. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.109>
- [67] Seongkook Heo, Christina Chung, Geehyuk Lee, and Daniel Wigdor.2018.雷神之锤。一个利用螺旋桨诱导的推进力的无接触力反馈设备。在 *2018年CHI计算系统中人的因素会议的论文集-CHI '18*。ACM Press, Montreal QC, Canada, 1-11. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174099>
- [68] Seongkook Heo, Jaeyeon Lee, and Daniel Wigdor.2019.PseudoBend: Producing Haptic Illusions of Stretching, Bending, and Twisting Using Grain Vibrations.在 *第32届ACM用户界面软件和技术研讨会论文集-UIST '19*。ACM Press, New Orleans, LA, USA, 803-813. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347941>
- [69] Anuruddha Hettiarachchi 和 Daniel Wigdor. 2016.Annexing Reality:启用日常物品作为增强现实中的有形代理的机会主义使用。在 *2016年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '16*。ACM Press, Santa Clara, California, USA, 1957-1967. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858134>
- [70] Matthias Hoppe, Pascal Knierim, Thomas Kosch, Markus Funk, Lauren Futami, Stefan Schneegass, Niels Henze, Albrecht Schmidt, and Tonja Machulla.2018.VRHapticDrones.通过四旋翼飞机在虚拟现实提供触觉。在 *第17届移动和泛在多媒体国际会议论文集-MUM 2018*。ACM出版社, 埃及开罗, 7-18. <https://doi.org/10.1145/3282894.3282898>
- [71] Matthias Hoppe, Daniel Neumann, Stephan Streuber, Albrecht Schmidt, and Tonja-Katrin Machulla.2020.人类的触摸。社会触摸增加了虚拟现实中的代理的可感知的人类相似性。 <https://doi.org/10.1145/3313831.3376719>
- [72] 黄新宇, 宁志伟, 王宝瑶, 郑仁浩, 和郑龙潘。2020.Haptic-go-round:一个用于虚拟现实体验中相遇型触觉的环绕平台。在 *2020年CHI计算系统中人的因素会议的论文集* 中。ACM, Honolulu HI USA, 1-10. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376476>
- [73] 布伦特-爱德华-英斯科。2001.被动触觉技术显著增强了虚拟环境。(2001), 111.
- [74] 岩田宏夫。2005.CirculaFloor. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1381227>

- [75] 岩田宏夫. 2013. 运动界面. 在《虚拟环境中的人类行走. *Perception, Technology, and Applications*, Frank Steinicke, Yon Visell, Jennifer Campos, and Anatole Lécuyer (Eds.). Springer, New York, NY, 199-219. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8432-6_9
- [76] Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Fumitaka Nakaizumi, and Ryo Kawamura. 2001. FEELEX项目: 为图形添加触觉表面. 在《第28届计算机图形和交互技术年会论文集 - SIGGRAPH '01》. ACM Press, Not Known, 469-476. <https://doi.org/10.1145/383259.383314>
- [77] Lynette Jones. 2000. 运动感测. 人类和机器触觉 (2000). <http://bdml.stanford.edu/twiki/pub/Haptics/PapersInProgress/jones00.pdf>
- [78] 艾琳-金和奥利弗-施耐德. 2020. 定义触觉体验. 理解、交流和评估HX的基础. 在《2020年CHI计算系统中人的因素会议的论文集》. ACM, Honolulu HI USA, 1-13. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376280>
- [79] Lawrence H. Kim, Daniel S. Drew, Veronika Domova, and Sean Follmer. 2020. 用户定义的蜂群机器人控制. 在《2020年CHI计算系统中人的因素会议的论文集》. ACM, Honolulu HI USA, 1-13. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376814>
- [80] Yaesol Kim, Hyun Jung Kim, and Young J. Kim. 2018. 使用每个平面可及性地图的大型VR环境的遭遇型触觉显示. 用于大型VR环境的相遇型触觉显示. *Computer Animation and Virtual Worlds* 29, 3-4 (May 2018), e1814. <https://doi.org/10.1002/cav.1814>
- [81] Pascal Knierim, Thomas Kosch, Valentin Schwind, Markus Funk, Francisco Kiss, Stefan Schneegass, and Niels Henze. 2017. 触觉无人机-通过四旋翼飞机在虚拟现实提供沉浸式触觉反馈. 在《2017年CHI会议计算系统中人的因素扩展摘要CHI EA'17会议上》. ACM Press, Denver, Colorado, USA, 433-436. <https://doi.org/10.1145/3027063.3050426>
- [82] 鲁夫-科利. 2010. 重定向触摸: 扭曲空间以重新映射被动触觉. In *2010 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*. IEEE, Waltham, MA, USA, 129-130. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2010.5444703>
- [83] L. Kohli, M. C. Whitton, and F. P. Brooks. 2012. 重定向触摸: 扭曲的空间对任务表现的影响. 在《2012年IEEE三维用户界面(3DUI)研讨会上》. IEEE, Costa Mesa, CA, 105-112. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2012.6184193>
- [84] Luv Kohli, Mary C. Whitton, and Frederick P. Brooks. 2013. 重定向触摸: 扭曲的虚拟空间中的训练和适应. 在《2013年IEEE三维用户界面(3DUI)研讨会上》. IEEE, Orlando, FL, 79-86. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2013.6550201>
- [85] Robert Kovacs, Eyal Ofek, Mar Gonzalez Franco, Alexa Fay Siu, Sebastian Marwecki, Christian Holz, and Mike Sinclair. 2020. Haptic PIVOT: 在VR中按需使用手持设备. 在《第33届ACM用户界面软件和技术年度研讨会(UIST '20)上》. 计算机协会 - 美国纽约, 1046-1059. <https://doi.org/10.1145/3379337.3415854>
- [86] Mathieu Le Goc, Lawrence H. Kim, Ali Parsaei, Jean-Daniel Fekete, Pierre Dragicevic, and Sean Follmer. 2016. Zooids: 蜂群用户界面的构建块. 在《第29届用户界面软件和技术年度研讨会论文集-UIST '16》. ACM出版社, 日本东京, 97-109. <https://doi.org/10.1145/2984511.2984547>
- [87] S.J. Lederman and R. L. Klatzky. 2009. 触觉感知. A tutorial. *Attention, Perception & Psychophysics* 71, 7 (Oct. 2009), 1439-1459. <https://doi.org/10.3758/APP.71.7.1439>
- [88] Chaehyun Lee, Min Sik Hong, In Lee, Oh Kyu Choi, Kyung-Lyong Han, Yoo Yeon Kim, Seungmoon Choi, and Jin S Lee. 2007. 用于大型沉浸式虚拟环境的移动触觉界面. *PoMHI* v0.5.(2007), 2.
- [89] In Lee, Inwook Hwang, Kyung-Lyong Han, Oh Kyu Choi, Seungmoon Choi, and Jin S. Lee. 2009. 移动触觉界面的系统改进. 在《2009年世界触觉会议-第三届欧洲触觉会议和虚拟环境和远程操作系统的触觉界面联合研讨会上》. IEEE, 盐湖城, UT, USA, 109-114. <https://doi.org/10.1109/WHC.2009.4810834>
- [90] Jaeyeon Lee, Mike Sinclair, Mar Gonzalez-Franco, Eyal Ofek, and Christian Holz. 2019. TORC: A Virtual Reality Controller for In-Hand High-Dexterity Finger Interaction. 在《2019年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '19》. ACM Press, Glasgow, Scotland UK, 1-13. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300301>
- [91] Daniel Leithinger, Sean Follmer, Alex Olwal, Samuel Luescher, Akimitsu Hogge, Jinha Lee, and Hiroshi Ishii. 2013. Sublimate: 改变状态的虚拟和物理渲染, 以增强与形状显示器的互动. 在《SIGCHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI'13》. ACM Press, Paris, France, 1441. <https://doi.org/10.1145/2470654.2466191>
- [92] Jean-Claude Lepecq, Lionel Bringoux, Jean-Marie Pergandi, Thelma Coyle, and Daniel Mestre. 2008. Afforded Actions as a Behavioral Assessment of Physical Presence. (2008), 8.
- [93] Jo-Yu Lo, Da-Yuan Huang, Chen-Kuo Sun, Chu-En Hou, and Bing-Yu Chen. 2018. RollingStone: 使用单滑道Tixel加强虚拟现实控制器的主动手指探索. 在《第31届ACM年度用户研讨会上》. 界面软件和技术-UIST '18. ACM出版社, 德国柏林, 839-851. <https://doi.org/10.1145/3242587.3242627>
- [94] Pedro Lopes, Patrik Jonell, and Patrick Baudisch. 2015. Affordance++: 允许物体交流动态使用. 在《第33届ACM计算系统中的人的因素年会论文集-CHI '15》. ACM出版社, 首尔, 大韩民国, 2515-2524. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702128>
- [95] Pedro Lopes, Sijing You, Lung-Pan Cheng, Sebastian Marwecki, and Patrick Baudisch. 2017. 通过肌肉电刺激为虚拟现实中的墙壁和重物提供触觉. 在《2017年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '17》. ACM出版社, 科罗拉多州丹佛, 美国, 1471-1482. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025600>
- [96] Anatole Lécuyer. 2009. 使用视觉模拟触觉反馈. 伪触觉反馈的研究和应用调查. *临场感: Teleoperators and Virtual Environments* 18, 1 (Feb. 2009), 39-53. <https://doi.org/10.1162/pres.18.1.39>
- [97] N. Magnenat-Thalmann, HyungSeok Kim, A. Egges, and S. Garchery. 2005. 虚拟世界中的可信性和交互性. 在《第11届国际多媒体建模会议上》. IEEE, Honolulu, HI, USA, 2-9. <https://doi.org/10.1109/MMMC.2005.24>
- [98] Lawrence Makin, Gareth Barnaby, and Anne Roudaut. 2019. 触觉和运动学反馈改善了虚拟现实中的距离感知. 在《第31届人机交互会议论文集-IHM '19》. ACM出版社, 法国格勒诺布尔, 1-9. <https://doi.org/10.1145/3366550.3372248>
- [99] Nicolai Marquardt, Miguel A. Nacenta, James E. Young, Sheelagh Carpendale, Saul Greenberg, and Ehud Sharlin. 2009. 触觉桌面小球: 交互式平板电脑的触觉反馈. 在《ACM国际交互式桌面和表面会议论文集-ITS '09》. ACM出版社, 阿尔伯塔省班夫市, 加拿大, 85. <https://doi.org/10.1145/1731903.1731922>
- [100] Thomas H Massie and J K Salisbury. 1994. PHANTOM触觉界面. 一个用于探测虚拟物体的设备. (1994), 5.
- [101] W.A. McNeely. 1993. 机器人图形: 用于虚拟现实的力反馈的新方法. 在《IEEE虚拟现实年度国际讨论会上》. 336-341. <https://doi.org/10.1109/VRAIS.1993.380761>
- [102] Leonel Merino, Magdalena Schwarzl, Matthias Kraus, Michael Sedlmair, Dieter Schmalstieg, and Daniel Weiskopf. 2020. 评估混合和增强现实. A Systematic Literature Review (2009-2019). *arXiv:2010.05988 [cs]* (Oct. 2020). <http://arxiv.org/abs/2010.05988> arXiv: 2010.05988.
- [103] 朱迪-莫林. 1997. 用于健康护理的虚拟现实: 一项调查. 技术报告.
- [104] Ken Nakagaki, Artem Dementyev, Sean Follmer, Joseph A. Paradiso, and Hiroshi Ishii. 2016. ChainFORM: 用于改变形状的界面的线性集成模块化硬件系统. 在《第29届用户界面软件和技术年度研讨会论文集-UIST '16》. ACM出版社, 日本东京, 87-96. <https://doi.org/10.1145/2984511.2984587>
- [105] Ken Nakagaki, Luke Vink, Jared Counts, Daniel Windham, Daniel Leithinger, Sean Follmer, and Hiroshi Ishii. 2016. Material: 响应直接物理触摸的形状变化界面, 渲染动态材料属性. 在《2016年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '16》. ACM Press, Santa Clara, California, USA, 2764-2772. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858104>
- [106] Norbert Nitzsche, Uwe D. Hanebeck, and G. Schmidt. 2003. 移动触觉界面的设计问题. *机器人系统杂志* 20, 9 (Sept. 2003), 549-556. <https://doi.org/10.1002/rob.10105>
- [107] 唐纳德-A.诺曼. 2013. 日常事物的设计 (修订和扩展版本). Basic Books, New York, New York.
- [108] Optitrack. 2019. 运动捕捉系统. <http://optitrack.com/index.html>
- [109] M.Ortega and S. Coquillart. 2005. 基于道具的触觉交互与同位和沉浸: 一个汽车应用. 在《IEEE国际触觉视听环境及其应用研讨会上》, 2005年. IEEE, 渥太华, 加拿大, 23-28. <https://doi.org/10.1109/HAVE.2005.1545646>
- [110] J.Pair, U. Neumann, D. Piepol, and B. Swartout. 2003. FlatWorld: 将Hol-lywood集合设计技术与VR相结合. *IEEE 计算机图形和应用* 23, 1 (Jan. 2003), 12-15. <https://doi.org/10.1109/MCG.2003.1159607>
- [111] Ryan A. Pavlik, Judy M. Vance, and Greg R. Luecke. 2013. 通过结合地面触觉设备和移动机器人基地与大型虚拟环境进行互动. 在《第28卷: 第33届工程中的计算机和信息会议》. ASME, 波特兰, 俄勒冈州, 美国, V02BT02A029. <https://doi.org/10.1115/DETC2013-13441>
- [112] M Poyade, L Molina-Tanco, A Reyes-Lecuona, A Langley, E Frutos, and S Flores. 2012. 在工业维护的背景下对触觉虚拟现实模拟的验证. (2012), 4.
- [113] Pragathi Praveena, Daniel Rakita, Bilge Mutlu, and Michael Gleicher. 2020. 通过机器人远程操作中的运动诱发的感官冲突实现重量感知的补充. 在《2020年ACM/IEEE国际人机交互会议论文集》. ACM, Cambridge United Kingdom, 509-517. <https://doi.org/10.1145/3319502.3374841>
- [114] William R. Provancher, Mark R. Cutkosky, Katherine J. Kuchenbecker, and Günter Niemeyer. 2005. 用于曲率和物体运动的触觉感知的接触位置显示. *The International Journal of Robotics Research* 24,

- 9 (Sept. 2005), 691-702. <https://doi.org/10.1177/0278364905057121>
- [115] Andreas Pusch and Anatole Lécuyer. 2011. 伪触觉：从理论基础到实践系统设计指南。在 *第13届多模态界面国际会议论文集-ICMI '11*。ACM出版社, 阿利坎特, 西班牙, 57. <https://doi.org/10.1145/2070481.2070494>
- [116] 苏珊娜·普茨, 德米特里·亚历山大罗夫斯基, 费利克斯·普茨, 塞巴斯蒂安·霍夫纳, 扬·大卫·斯梅丁克, 和雷纳·马拉卡。2020. 打破体验。VR用户研究中问卷调查的影响。在 *2020年CHI计算系统中人的因素会议论文集*中。ACM, Honolulu HI USA, 1-15. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376144>
- [117] Ismo Rakkolainen, Euan Freeman, Antti Sand, Roope Raisamo, and Stephen Brewster. 2020. 中空超声触觉及其应用的调查。 *IEEE触觉反应* (2020), 1-1. <https://doi.org/10.1109/TOH.2020.3018754>
- [118] Karan Rangarajan, Heather Davis, and Philip H. Pucher. 2020. 外科模拟中的虚拟触觉的系统回顾。一个有效的教育工具? *外科教育杂志* 77, 2 (2020年3月), 337-347. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2019.09.006>
- [119] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, and Mary C. Whitton. 2001. *EUROGRAPHICS 2001 / Jonathan C. Roberts* 简报 © 欧洲图形协会 2001. 重新定向的行走。
- [120] Michael Rietzler, Florian Geiselhart, Jan Gugenheimer, and Enrico Rukzio. 2018. 打破追踪。使用可感知的跟踪偏移来启用重量感知。在 *2018年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '18*。ACM Press, Montreal QC, Canada, 1-12. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173702>
- [121] Michael Rietzler, Gabriel Haas, Thomas Dreja, Florian Geiselhart, and Enrico Rukzio. 2019. 虚拟肌肉力量。通过伪触觉反馈和肌肉输入来交流运动。在 *第32届ACM用户界面软件和技术研讨会论文集-UIST '19*。ACM Press, New Orleans, LA, USA, 913-922. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347871>
- [122] Calvin Rubens, Sean Braley, Antonio Gomes, Daniel Goc, Xujing Zhang, Juan Pablo Carrascal, and Roel Vertegaal. 2015. BitDrones: 使用交互式三维四旋翼飞机显示器实现悬浮的可编程物质。在 *第28届ACM用户界面软件与技术年度研讨会论文集-UIST '15 Adjunct*。ACM Press, Daegu, Kyungpook, Republic of Korea, 57-58. <https://doi.org/10.1145/2815585.2817810>
- [123] K. Martin Sagayam and D. Jude Hemanth. 2017. 用于虚拟现实应用的手势和手势识别技术：一项调查。 *虚拟现实* 21, 2 (June 2017), 91-107. <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0301-0>
- [124] Shahabedin Sagheb, Frank Wencheng Liu, Alireza Bahremand, Assegid Kidane, and Robert LiKamWa. 2019. SWISH: A Shifting-Weight Interface of Simulated Hydrodynamics for Haptic Perception of Virtual Fluid Vessels. 载于 *第32届ACM用户界面软件和技术研讨会论文集-UIST '19*。ACM Press, New Orleans, LA, USA, 751-761. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347870>
- [125] Majed Samad, Elia Gatti, Anne Hermes, Hrvoje Benko, and Cesare Parise. 2019. 伪触觉重量。通过操纵控制-显示比例改变虚拟物体的感知重量。在 *2019年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '19*。ACM Press, Glasgow, Scotland UK, 1-13. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300550>
- [126] Massimo Sattler, Carlo A. Avizzano, and Emanuele Ruffaldi. 2011. 桌面移动触觉界面的控制。In *2011 IEEE World Haptics Conference*. IEEE, 伊斯坦布尔, 415-420. <https://doi.org/10.1109/WHC.2011.5945522>
- [127] M. 佐藤. 2002. SPIDAR 和虚拟现实。在 *第五届两年一度的世界自动化大会*上, 第13卷。17-23. <https://doi.org/10.1109/WAC.2002.1049515>
- [128] 吉安·卢卡·萨维诺. 2020. Virtual Smartphone: 高保真交互与虚拟现实中的代理对象。 *arXiv:2010.00942 [cs]* (Oct. 2020). <http://arxiv.org/abs/2010.00942> arXiv: 2010.00942.
- [129] Dominik Schmidt, Rob Kovacs, Vikram Mehta, Udayan Umaphathi, Sven Köhler, Lung-Pan Cheng, and Patrick Baudisch. 2015. Level-Ups. 模拟虚拟现实中的楼梯台阶的电动高跷。在 *第33届ACM计算系统中人的因素年会的论文集-CHI '15*。ACM出版社, 首尔。大韩民国, 2157-2160. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702253>
- [130] Martijn J. Schuemie, Peter van der Straaten, Merel Krijn, and Charles A.P.G. van der Mast. 2001. 关于虚拟现实中的研究。一项调查。 *CyberPsychology & Behavior* 4, 2 (April 2001), 183-201. <https://doi.org/10.1089/109493101300117884>
- [131] Valentin Schwind, Pascal Knierim, Nico Haas, and Niels Henze. 2019. 在虚拟现实中使用存在感调查表。In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '19*. ACM Press, Glasgow, Scott UK, 1-12. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300590>
- [132] Hasti Seifi, Farimah Fazlollahi, Michael Oppermann, John Andrew Sastrillo, Jessica Ip, Ashutosh Agrawal, Gunhyuk Park, Katherine J. Kuchenbecker, and Karon E. MacLean. 2019. Haptipedia: 加速触觉设备发现以支持交互和工程设计。在 *2019年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '19*。ACM Press, Glasgow, Scotland UK, 1-12. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300788>
- [133] Emily Shaw, Tessa Roper, Tommy Nilsson, Glyn Lawson, Sue V. G. Cobb, and Daniel Miller. 2019. The Heat is On: 探索用户在火灾疏散的多感官虚拟环境中的行为。在 *2019年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '19* (2019), 1-13. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300856> arXiv: 1902.04573.
- [134] Jotaro Shigeyama, Takeru Hashimoto, Shigeo Yoshida, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. 2019. Transcalibur: 一个基于计算感知模型的二维形状渲染的重量转移虚拟现实控制器。在 *2019年CHI计算系统中人的因素会议的论文集-CHI '19*。ACM Press, Glasgow, Scotland UK, 1-11. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300241>
- [135] Adalberto L. Simeone, Eduardo Velloso, and Hans Gellersen. 2015. 替代性的现实。使用物理环境来设计虚拟现实体验。见 *《第33届ACM计算系统中人的因素年会-CHI '15》*。ACM出版社, 韩国首尔, 3307-3316. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702389>
- [136] Mike Sinclair, Eyal Ofek, Mar Gonzalez-Franco, and Christian Holz. 2019. CapstanCrunch: 一个具有用户提供的力反馈的触觉VR控制器。在 *第32届ACM用户界面软件和技术研讨会论文集-UIST '19*。ACM Press, New Orleans, LA, USA, 815-829. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347891>
- [137] Mike Sinclair, Michel Pahud, and Hrvoje Benko. 2014. TouchMover 2.0 - 带有力反馈和触觉纹理的3D触摸屏。在 *2014年IEEE触觉交流会 (HAPTICS)* 上。IEEE, Houston, TX, USA, 1-6. <https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2014.6775425>
- [138] Alexa F. Siu, Eric J. Gonzalez, Shenli Yuan, Jason B. Ginsberg, and Sean Follmer. 2018年. shapeShift: 用于有形和触觉交互的桌面形状显示器的二维空间操纵和自动化。在 *2018年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '18*。ACM出版社。加拿大QC蒙特利尔, 1-13. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173865>
- [139] Mel Slater. 1999. 衡量存在感。对 Witmer 和 Singer 存在感问卷的回应。 *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 8, 5 (Oct. 1999), 560-565. <https://doi.org/10.1162/105474699566477> Publisher: MIT Press.
- [140] Mel Slater, Martin Usoh, and Anthony Steed. 1994. 虚拟环境中的存在深度。 *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 3, 2 (Jan. 1994), 130-144. <https://doi.org/10.1162/pres.1994.3.2.130>
- [141] 安东尼·斯蒂德, 塞巴斯蒂安·弗里斯顿, 维贾伊·帕瓦尔, 和大卫·斯瓦普. 2020. 对接触觉。 *ArXiv:2002.06093 [cs]* (Feb. 2020). <http://arxiv.org/abs/2002.06093> arXiv: 2002.06093.
- [142] Frank Steinicke, Visell Yon, Jennifer Campos, and Anatole Lécuyer (编者). 2013. *虚拟环境中的人类行走：感知、技术和应用*. Springer, New York, NY. OCLC: 856865949.
- [143] Patrick L. Strandholt, Oana A. Dogaru, Niels C. Nilsson, Rolf Nordahl, and Stefania Serafin. 2020. 敲击木头。结合重量向触感和物理道具在虚拟现实中进行基于工具的交互。在 *2020年CHI计算系统中人的因素会议的论文集*中。ACM, Honolulu HI USA, 1-13. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376303>
- [144] Evan Strasnick, Christian Holz, Eyal Ofek, Mike Sinclair, and Hrvoje Benko. 2018. Haptic Links: 使用可变硬度驱动虚拟现实的双臂触觉技术。在 *2018年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '18*。ACM Press, Montreal QC, Canada, 1-12. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174218>
- [145] Paul Strohmeier, Seref Güngör, Luis Herres, Dennis Gudea, Bruno Fruchard, and Jürgen Steimle. 2020年. bARefoot. 使用鞋中的运动耦合振动生成虚拟材料。在 *第33届ACM用户界面软件和技术年度研讨会*上。ACM, Virtual Event USA, 579-593. <https://doi.org/10.1145/3379337.3415828>
- [146] 孙玉倩, 吉田茂雄, 成实拓二, 广濑道隆. 2019. PaCaPa: 用于渲染基于工具的交互中的虚拟对象的尺寸、形状和刚度的手持VR设备。在 *2019年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '19* 中。ACM Press, Glasgow, Scotland UK, 1-12. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300682>
- [147] 伊万·萨瑟兰. 1965. 终极展示》。(1965), 2.
- [148] Ryo Suzuki, Hooman Hedayati, Clement Zheng, James Bohn, Daniel Szafir, Ellen Yi-Luen Do, Mark D Gross, and Daniel Leithinger. 2020. RoomShift: 房间规模动态触觉的VR与家具移动的群机器人。(2020), 11.
- [149] Ryo Suzuki, Junichi Yamaoka, Daniel Leithinger, Tom Yeh, Mark D. Gross, Yoshihiro Kawahara, and Yasuaki Kakehi. 2018. Dynablock: 动态3D打印的即时和可重构的形状形成。在 *第31届ACM用户界面软件和技术研讨会 - UIST '18*。ACM出版社。德国柏林, 99-111. <https://doi.org/10.1145/3242587.3242659>
- [150] Ryo Suzuki, Clement Zheng, Yasuaki Kakehi, Tom Yeh, Ellen Yi-Luen Do, Mark D Gross, and Daniel Leithinger. 2019. ShapeBots: 形状改变的蜂群机器人。(2019), 13.
- [151] N. Takizawa, H. Yano, H. Iwata, Y. Oshiro, and N. Ohkohchi. 2017. 遇到的类型的触觉界面用于表示三维虚拟的形状和刚度

- 对象。 *IEEE Transactions on Haptics* 10, 4 (Oct. 2017), 500-510. <https://doi.org/10.1109/TOH.2017.2740934>
- [152] Anthony Talvas, Maud Marchal, and Anatole Lecuyer. 2014. 双手触觉交互的调查。 *IEEE 触觉学论文集* 7, 3 (2014年7月), 285-300. <https://doi.org/10.1109/TOH.2014.2314456>
- [153] Shan-Yuan Teng, Tzu-Sheng Kuo, Chi Wang, Chi-huan Chiang, Da-Yuan Huang, Liwei Chan, and Bing-Yu Chen. 2018. PuPoP: Pop-up Prop on Palm for Virtual Reality. In *The 31 Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '18*. ACM出版社, 德国柏林, 5-17. <https://doi.org/10.1145/3242587.3242628>
- [154] Shan-Yuan Teng, Cheng-Lung Lin, Chi-huan Chiang, Tzu-Sheng Kuo, Liwei Chan, Da-Yuan Huang, and Bing-Yu Chen. 2019. TilePoP: Tile-type Pop-up Prop for Virtual Reality. (2019), 11.
- [155] Marc Teyssier, Gilles Bailly, Catherine Pelachaud, and Eric Lecolinet. 2020. 通过设备启动的触摸传达情感。 *IEEE Transactions on Affective Computing* (2020), 1-1. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2020.3008693>
- [156] N.G. Tsagarakis, T. Horne, and D. G. Caldwell. 2005. SLIP AESTHEASIS: 一个便携式的指尖2D滑动/皮肤拉伸显示器。在 *第一届欧洲触觉会议和虚拟环境和远程操作系统的触觉界面研讨会* 上。 *世界触觉会议*. 214-219. <https://doi.org/10.1109/whc.2005.117>
- [157] 蔡新瑞和陈冰玉. 2019. ElastImpact: 在头戴式显示器上使用弹性的2.5D多层次即时冲击。In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM, New Orleans LA USA, 429-437. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347931>
- [158] Hsin-Ruey Tsai and Jun Rekimoto. 2018. ElasticVR: 利用弹性在虚拟现实提供多层次的主动力和被动力反馈。在 *2018年CHI计算系统中人的因素会议的扩展摘要* 中 - *CHI '18*. ACM Press, Montreal QC, Canada, 1-4. <https://doi.org/10.1145/3170427.3186540>
- [159] Evgeny Tsykunov, Roman Ibrahimov, Derek Vasquez, and Dmztry Tsetsurkou. 2019. SlingDrone: 使用单个无人机进行指点和互动的混合现实系统。在 *第25届ACM虚拟现实软件和技术研讨会* 上 - *VRST '19*. ACM Press, Parramatta, NSW, Australia, 1-5. <https://doi.org/10.1145/3359996.3364271>
- [160] 叶夫根尼-齐库诺夫和德兹米特里-采瑟鲁库. 2019. WiredSwarm: 由一群无人机向用户的臂提供的高分辨率触觉反馈, 用于VR交互。在 *第25届ACM虚拟现实软件和技术研讨会* 上 - *VRST '19*. ACM Press, Parramatta, NSW, Australia, 1-2. <https://doi.org/10.1145/3359996.3364789>
- [161] Sebastian Ullrich. 2012. 虚拟环境中医学模拟的触觉触诊。 *IEE交易的可视化与计算机图形* 18, 4 (2012), 9.
- [162] Martin Usoh, Kevin Arthur, Mary C. Whitton, Rui Bastos, Anthony Steed, Mel Slater, and Frederick P. Brooks. 1999. 在虚拟环境中行走>原地行走>飞行。在 *第26届计算机图形和交互技术年会-SIGGRAPH'99会议* 上。 ACM Press, Not Known, 359-364. <https://doi.org/10.1145/311535.311589>
- [163] Martin Usoh, Ernest Catena, Sima Arman, and Mel Slater. 2000. 在现实中使用存在感调查表。 *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 9, 5 (Oct. 2000), 497-503. <https://doi.org/10.1162/105474600566989>
- [164] Varalakshmi, Thriveni, Venugopal, and Patnaik. 2012. 触觉。技术现状调查。 *IJCSI国际计算机科学问题杂志* (2012). <https://core.ac.uk/download/pdf/25725449.pdf>
- [165] David Steeven Villa Salazar, Claudio Pacchierotti, Xavier De Tinguy De La Girouliere, Anderson Maciel, and Maud Marchal. 2020. 使用可穿戴触觉技术改变虚拟现实中有形物体的硬度、摩擦力和形状感知。 *IEEE Transactions on Haptics* (2020), 1-1. <https://doi.org/10.1109/TOH.2020.2967389>
- [166] Emanuel Vonach, Clemens Gatterer, and Hannes Kaufmann. 2017. VRRobot: 无限虚拟环境中的机器人驱动的工具。In *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*. IEEE, Los Angeles, CA, USA, 74-83. <https://doi.org/10.1109/VR.2017.7892233>
- [167] 王智, 黄大元, 徐硕文, 林成龙, 赵玉伦, 侯初恩, 陈炳玉. 2020. 胫骨。探索腿部的皮肤拉伸反馈, 以增强虚拟现实的体验。 (2020), 14.
- [168] 王丹晓, 郭媛, 张玉茹, XY Weiliang, 和WWIA Jing. 2020. 用于虚拟现实的触觉显示: 进展与挑战 | Elsevier Enhanced Reader. <https://doi.org/10.3724/SP.J.2096-5796.2019.0008> ISSN: 2096-5796.
- [169] 王丹晓, 大西幸平, 和徐伟良. 2020. 用于虚拟现实的多模态触觉显示。A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67, 1 (Jan. 2020), 610-623. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2920602>
- [170] 王云涛, 李汉川, 曹正毅, 罗慧仪, 欧可, 约翰-雷蒂, 于春, 施维塔克-帕特尔, 和史元春. 2020. MoveVR: 利用家用清洁机器人在虚拟现实实现多形式的力反馈。 (2020), 12.
- [171] Tzu-Yun Wei, Hsin-Ruey Tsai, Yu-So Liao, Chieh Tsai, Yi-Shan Chen, Chi Wang, and Bing-Yu Chen. 2020. ElasticLinks: 具有动态施力点的VR控制器之间的力反馈。在 *第33届年度会议的会议记录* 中
- ACM用户界面软件和技术研讨会。ACM, 虚拟活动 美国, 1023-1034. <https://doi.org/10.1145/3379337.3415836>
- [172] Alan Wexelblat. 1993. 虚拟现实: 应用和探索。 <http://libertar.io/lab/wp-content/uploads/2016/02/VirtualReality-Applications.And.Explorations.pdf?page=164> Myron Krueger, Artificial reality 2 An easy entry to Virtual reality Chap 7.
- [173] Eric Whitmire, Hrvoje Benko, Christian Holz, Eyal Ofek, and Mike Sinclair. 2018. Haptic Revolver: 触摸、剪切、纹理和形状渲染在可重构的虚拟现实控制器上。在 *2018年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '18*. ACM Press, Montreal QC, 加拿大, 1-12. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173660>
- [174] Frederik Winther, Linoj Ravindran, Kasper Paabol Svendsen, and Tiare Feuchtnner. 2020. 基于格兰富公司的一个用例, 设计和评估水泵维护的VR培训模拟。In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, Atlanta, GA, USA, 738-746. <https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.1580939036664>
- [175] Bob G. Witmer和Michael J. Singer. 1998. 测量虚拟环境中的存在感。A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 7, 3 (June 1998), 225-240. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>
- [176] 夏海钧, Sebastian Herscher, Ken Perlin, 和Daniel Wigdor. 2018. 时空。启用虚拟现实中的流体个人和协作编辑。在 *第31届ACM用户界面软件和技术研讨会* 上 - *UIST '18*. ACM Press, Berlin, Germany, 853-866. <https://doi.org/10.1145/3242587.3242597>
- [177] 夏平君. 2016. 用于产品设计和制造模拟的触觉技术. *IEEE Transactions on Haptics* 9, 3 (July 2016), 358-375. <https://doi.org/10.1109/TOH.2016.2554551>
- [178] Kotaro Yamaguchi, Ginga Kato, Yoshihiro Kuroda, Kiyoshi Kiyokawa, and Haruo Takemura. 2016. 使用无人机的非接地和遭遇型触觉显示。在 *2016年空间用户交互研讨会论文集-SUI '16*. ACM出版社, 日本东京, 43-46. <https://doi.org/10.1145/2983310.2985746>
- [179] Jackie (Junrui) Yang, Christian Holz, Eyal Ofek, and Andrew D. Wilson. 2019. DreamWalker: 用虚拟现实代替现实世界的行走体验。在 *第32届ACM用户界面软件和技术研讨会论文集-UIST '19*. ACM Press, New Orleans, LA, USA, 1093-1107. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347875>
- [180] 叶远云, 陈新宇, 和陈立伟. 2019. 拉举。用身体尺度的体感力反馈加强虚拟现实中的悬挂活动。在 *第32届ACM用户界面软件和技术研讨会论文集-UIST '19*. ACM Press, New Orleans, LA, USA, 791-801. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347874>
- [181] 严义贤, 高岛和树, 唐炳辉, 田野隆之, 藤田和之, 北村芳文. 2020. ZoomWalls: 为房间规模的VR世界模拟触觉基础设施的动态墙体。在 *第33届ACM用户界面软件和技术研讨会 (UIST '20) 的论文集* 中。美国计算机协会, 纽约, 美国, 223-235. <https://doi.org/10.1145/3379337.3415859>
- [182] Yasuyoshi Yokokohji, Ralph L. Hollis, and Takeo Kanade. 1999. WYSIWYF Display: 虚拟环境的视觉/触觉界面。 *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 8, 4 (Aug. 1999), 412-434. <https://doi.org/10.1162/105474699566314>
- [183] Y. Yokokohji, J. Kinoshita, and T. Yoshikawa. 2001. 在三维空间中呈现多个物体的相遇型触觉设备的路径规划。In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001.271-278*. <https://doi.org/10.1109/VR.2001.913796>
- [184] Yasuyoshi Yokokohji, Nobuhiko Muramori, Yuji Sato, and Tsuneo Yoshikawa. 2005. 基于对人类抓取行为观察的多指尖接触的触觉显示。
- [185] Shigeo Yoshida, Yuqian Sun, and Hideaki Kuzuoka. 2020. PoCoPo: 用于虚拟现实中的触觉渲染的基于针的手持式形状显示。在 *2020年CHI计算系统中人的因素会议的论文集* 中。ACM, 美国夏威夷火奴鲁鲁, 1-13. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376358>
- [186] Andre Zenner and Antonio Kruger. 2017. Shifty: 一个移重的动态被动触觉代理, 以增强虚拟现实中的物体感知。 *IEEE 视觉化和计算机图形学的互动* 23, 4 (April 2017), 1285-1294. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2656978>
- [187] André Zenner 和 Antonio Krüger. 2019. Drag-on: 一个提供基于阻力和重量转移的触觉反馈的虚拟现实控制器。在 *2019年CHI计算系统中人的因素会议论文集-CHI '19*. ACM Press, Glasgow, Scotland UK, 1-12. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300441>
- [188] QinPing Zhao. 2009. 关于虚拟现实的调查。 *中国科学F系列: 信息科学* 52, 3 (2009年3月), 348-400. <https://doi.org/10.1007/s11432-009-0066-0>
- [189] Yiwei Zhao and Sean Follmer. 2018. 一种基于功能优化的方法, 用于触觉虚拟现实任意复杂边界的连续三维重定向触摸。在 *2018年CHI计算系统中人的因素会议的论文集-CHI '18*. ACM Press, Montreal QC, Canada, 1-12. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174118>

- [190] Yiwei Zhao, Lawrence H. Kim, Ye Wang, Mathieu Le Goc, and Sean Follmer. 2017. 用于有形互动和虚拟现实的触觉代理物体的机器人组装。在 *ZZZ-ISS'17 的互动表面和空间论文集* 中。ACM Press, Brighton, United Kingdom, 82-91. <https://doi.org/10.1145/3132272.3134143>
- [191] 周宁宁和邓玉龙。2009. 虚拟现实。一个最先进的调查。 *International Journal of Automation and Computing* 6, 4 (Nove. 2009), 319-325. <https://doi.org/10.1007/s11633-009-0319-9>
- [192] Mounia Ziat, Taylor Rolison, Andrew Shirtz, Daniel Wilbern, and Carrie Anne Balcer. 2014. 通过触觉反馈增强虚拟沉浸感。在 *第27届ACM年度用户界面软件和技术研讨会的副刊论文中 - UIST'14副刊*。ACM出版社, 夏威夷檀香山。美国, 65-66. <https://doi.org/10.1145/2658779.2659116>
- [193] Daniel Zielasko和Bernhard E Riecke。2020. 要么给我一个站起来的理由, 要么给我一个坐在VR里的机会。(2020), 3.
- [194] C.B. Zilles和J. K. Salisbury。1995. 用于触觉显示的基于约束的神-物方法。在 *国际智能机器人和系统会议上*。146-151.
- [195] Peter Zimmermann. 2008. 虚拟现实辅助设计。在 *汽车工业中使用VR的调查*。(Jan. 2008). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8200-9_13